

JAERI-M
88-224

高転換軽水炉の熱流力特性パラメータサーベイ

1988年11月

森 貴正・中川 正幸・藤井 貞夫*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

高転換軽水炉の熱流力特性パラメータサーベイ

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

森 貴正・中川 正幸・藤井 貞夫*

(1988年10月20日受理)

高転換軽水炉(HCLWR)の熱流力特性の概要を把握し、炉心成立の可能範囲を明確にすることを目的として、単位セルモデルに基づく熱流力特性パラメータサーベイを行った。対象としたHCLWRプラントは、現用100万kW_e級PWRプラントの炉心及びその周辺部のみを置換したものとし、燃料ピン径、ピッチ、炉心高さ、線出力、ホットチャンネル因子を広範囲に変化させ、燃料最高温度、最小DNBR、取り出し可能な炉心熱出力等を計算した。また、全炉心サブチャンネル解析を行い、単位セルモデルの妥当性を検討し、安全側の評価を与えることを確認した。

Parametric Study on Thermal-Hydraulic Characteristics
of High Conversion Light Water Reactor

Takamasa MORI, Masayuki NAKAGAWA and Sadao FUJII*

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 20, 1988)

To assess the feasibility of high conversion light water reactors (HCLWRs) from the thermal-hydraulic viewpoint, parametric study on thermal-hydraulic characteristics of HCLWR has been carried out by using a unit cell model. It is assumed that a HCLWR core is contained in a current 1000 MWe PWR plant. At the present study, reactor core parameters such as fuel pin diameter, pitch, core height and linear heat rate are widely and parametrically changed to survey the relation between these parameters and the basic thermal-hydraulic characteristics, i.e. maximum fuel temperature, minimum DNBR, reduction of reactor thermal output and so on. The validity of the unit cell model used has been ensured by comparison with the result of a subchannel analysis carried out for a whole core.

Keywords: HCLWR, Thermal-Hydraulic Characteristics, Parametric Study,
Reactor Core Parameter, Unit Cell Model, Current PWR Plant,
Subchannel Analysis

* Kawasaki Heavy Industries, Co. Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. パラメータサーベイの方法	2
2.1 高転換軽水炉プラントモデル	2
2.1.1 概 要	2
2.1.2 炉心モデル	2
2.1.3 炉心パラメータとその範囲	3
2.2 解析方法	4
2.2.1 単位セルモデル	4
2.2.2 炉心圧損, 冷却材流量及び冷却材温度	4
2.2.3 DNB _R の計算	8
2.2.4 燃料温度解析	10
2.2.5 二次系の特性による熱出力減少割合	10
2.2.6 計算コード: GAPCON-THERMAL2-HC	12
2.3 封入ヘリウム圧とプレナム長の決定	12
3. 全炉心解析と単位セルモデルの妥当性の検討 — HCLWR-J1炉心の解析 —	21
3.1 HCLWR-J1炉心	21
3.2 2バンドルモデルによるサーベイ計算	22
3.3 全炉心サブチャンネル解析	25
3.4 評価結果	26
4. パラメータサーベイの結果	40
4.1 スパイラルリブスペーサ型炉心	40
4.2 グリッドスペーサ型炉心	41
5. 炉心成立性の検討	67
6. ま と め	89
謝 辞	90
参考文献	91
付録1 GAPCON-THERMAL2-HCコードの燃料温度解析法	93
付録2 COBRA-HCLWRコード	97
付録3 GAPCON-THERMAL2-HCコードの入力方法	107
付録4 COBRA-HCLWRコードの入力方法	118

Contents

1. Introduction	1
2. Method of Parametric Study on Thermal-Hydraulic Characteristics	2
2.1 HCLWR Plant Model	2
2.1.1 General Feature	2
2.1.2 Reactor Core Model	2
2.1.3 Reactor Core Parameters and their Ranges	3
2.2 Calculation Method	4
2.2.1 Unit Cell Model	4
2.2.2 Core Pressure Loss, Flow Rate and Temperature of Primary Coolant	4
2.2.3 DNBR Analysis	8
2.2.4 Calculation of Fuel Temperature	10
2.2.5 Reduction Ratio of Thermal Output	10
2.2.6 Computer Code : GAPCON-THERMAL2-HC	12
2.3 Initial Helium Pressure and Plenum Length	12
3. Whole Core Analysis and Check of Unit Cell Model — Analysis of HCLWR-J1 Core —	21
3.1 HCLWR-J1 Core	21
3.2 Parametric Study based on Two Bundle Model	22
3.3 Whole Core Analysis	25
3.4 Discussion	26
4. Results of Parametric Study	40
4.1 Reactors with Spiral Rib Spacer	40
4.2 Reactors with Grid Spacer	41
5. Discussion on Feasibility of HCLWR	67
6. Conclusion	89
Acknowledgments	90
Reference	91
Appendix 1 Fuel Temperature Calculation by GAPCON-THERMAL2-HC Code.	93
Appendix 2 COBRA-HCLWR Code	97
Appendix 3 Input Instruction for GAPCON-THERMAL2-HC Code	107
Appendix 4 Input Instruction for COBRA-HCLWR Code	118

List of Tables

Table 2.1	Specification of 1100 MWe PWR plant	15
Table 2.2	Specification of steam generator	15
Table 2.3	DNB correlation	16
Table 3.1	Specification of HCLWR-J1	28
Table 3.2	Specification of fuel pin and assembly (HCLWR-J1)	28
Table 3.3	Effect of input parameters in COBRA-HCLWR calculation (two bundle model)	29
Table 3.4	Effect of radial peaking (two bundle model)	30
Table 3.5	Effect of radial peaking (two bundle model, 5 % bypass flow)	30
Table 3.6	Comparison between two bundle and unit cell models	31
Table 3.7	Effect of input parameters in COBRA-HCLWR calculation (1/12 core, 33 bundle model)	32
Table A2.1	Parameter variation with channel lumping	102
Table A2.2	Comparison between GAPCON-THERMAL2-HC and COBRA-HCLWR (unit cell model, without pump property)	103
Table A2.3	Comparison between GAPCON-THERMAL2-HC and COBRA-HCLWR (unit cell model, with pump property)	104

List of Figures

Fig.2.1	Unit cell with spiral rib spacer	16
Fig.2.2	Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. initial helium pressure (parameter : plenum length)	17
Fig.2.3	Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : linear heat rate)	17
Fig.2.4	Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : core height)	18
Fig.2.5	Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : pin pitch)	18
Fig.2.6	Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : pin diameter)	19
Fig.2.7	$F_{\beta} \frac{S}{H}$ and minimum DNBR vs. plenum length	19
Fig.2.8	Pressure drop and average velocity vs. plenum length	20
Fig.2.9	Effect of gas release models and gap widths	20
Fig.3.1	Fuel assembly of HCLWR-J1	33
Fig.3.2	1/6 core geometry and initial fissile Pu distribution in HCLWR-J1	33
Fig.3.3	Shuffling pattern of HCLWR-J1	34
Fig.3.4	Power distribution in HCLWR-J1 (beginning of the sixth cycle)	34
Fig.3.5	Two bundle model	35
Fig.3.6	Transverse momentum control volume for standard subchannel nodding	35
Fig.3.7	Axial distribution of coolant temperature (β effect in two bundle model)	36
Fig.3.8	Axial distribution of cross flow (β effect in two bundle model)	36
Fig.3.9	MDNBR vs. radial peaking factor (two bundle model)	37
Fig.3.10	Reduction ratio of coolant flow in hot bundle (two bundle model)	37
Fig.3.11	COBRA-HCLWR calculation model for HCLWR-J1 (1/12 core, 33 bundle model)	38
Fig.3.12	MDNBR vs. radial peaking factor (comparison between 1/12 core, two bundle and unit cell model)	38
Fig.3.13	Reduction ratio of coolant flow in hot bundle (comparison between 1/12 core and two bundle models)	39

Fig.3.14 MDNBR vs. radial peaking factor (over power factor = 1.12, 1/12 core model)	39
Fig.4.1 Axial distribution of fuel temperature (spiral rib)	43
Fig.4.2 Maximum fuel temperature vs. hot channel factor (spiral rib)	43
Fig.4.3 Axial distribution of DNB heat flux (spiral rib)	44
Fig.4.4 Axial distribution of DNBR (spiral rib)	44
Fig.4.5 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0\text{m}, Q_L=16\text{kW/m}$)	45
Fig.4.6 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.5\text{m}, Q_L=16\text{kW/m}$)	45
Fig.4.7 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0\text{m}, Q_L=18\text{kW/m}$)	46
Fig.4.8 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.5\text{m}, Q_L=18\text{kW/m}$)	46
Fig.4.9 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0\text{m}, Q_L=20\text{kW/m}$)	47
Fig.4.10 Minimum DNBR vs. pin diameter (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.5\text{m}, Q_L=20\text{kW/m}$)	47
Fig.4.11 Minimum DNBR vs. pin pitch (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0\text{m}, Q_L=16\text{kW/m}$)	48
Fig.4.12 Minimum DNBR vs. pin pitch (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.5\text{m}, Q_L=16\text{kW/m}$)	48
Fig.4.13 Minimum DNBR vs. pin pitch (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0\text{m}, Q_L=18\text{kW/m}$)	49
Fig.4.14 Minimum DNBR vs. pin pitch (spiral rib, $F_{DH}=1.5, L_C=2.5\text{m}, Q_L=18\text{kW/m}$)	49
Fig.4.15 Minimum DNBR vs. linear heat rate (KfK correlation, spiral rib, $F_{DH}=1.5$)	50
Fig.4.16 Minimum DNBR vs. linear heat rate (EPRI correlation, spiral rib, $F_{DH}=1.5$)	50
Fig.4.17 Minimum DNBR vs. core height (KfK correlation, spiral rib, $F_{DH}=1.5$)	51
Fig.4.18 Minimum DNBR vs. core height (EPRI correlation, spiral rib, $F_{DH}=1.5$)	51
Fig.4.19 Core pressure drop vs. pin diameter (spiral rib)	52
Fig.4.20 Average velocity vs. pin diameter (spiral rib)	52
Fig.4.21 Flow rate in primary loop vs. pin pitch (spiral rib)	53

Fig.4.22 Possible reactor thermal output vs. flow rate in primary loop	53
Fig.4.23 Maximum fuel temperature vs. hot channel factor (grid) ..	54
Fig.4.24 Axial distribution of DNB heat lux (grid)	54
Fig.4.25 Axial distribution of DNBR (grid)	55
Fig.4.26 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=16kW/m$)	56
Fig.4.27 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=16kW/m$)	56
Fig.4.28 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=16kW/m$)	57
Fig.4.29 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=18kW/m$)	57
Fig.4.30 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=18kW/m$)	58
Fig.4.31 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=18kW/m$)	58
Fig.4.32 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=20kW/m$)	59
Fig.4.33 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=20kW/m$)	59
Fig.4.34 Minimum DNBR vs. pin diameter (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=20kW/m$)	60
Fig.4.35 Minimum DNBR vs. pin pitch (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=16kW/m$)	60
Fig.4.36 Minimum DNBR vs. pin pitch (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=16kW/m$)	61
Fig.4.37 Minimum DNBR vs. pin pitch (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=16kW/m$)	61
Fig.4.38 Minimum DNBR vs. pin pitch (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=18kW/m$)	62
Fig.4.39 Minimum DNBR vs. pin pitch (grid, $F_{AH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=20kW/m$)	62
Fig.4.40 Minimum DNBR vs. linear heat rate (KfK correlation, grid, $L_{AH}=1.5$)	63
Fig.4.41 Minimum DNBR vs. linear heat rate (EPRI correlation, grid, $F_{AH}=1.5$)	63

Fig.4.42 Minimum DNBR vs. core height
 (KfK correlation, grid, $F_{DH}=1.5$) 64

Fig.4.43 Minimum DNBR vs. core height
 (EPRI correlation, grid, $F_{DH}=1.5$) 64

Fig.4.44 Core pressure drop vs. pin pitch (grid) 65

Fig.4.45 Average velocity vs. pin pitch (grid) 65

Fig.4.46 Flow rate in primary loop vs. pin pitch (grid) 66

Fig.5.1 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2, 2.5\text{m}$) 70

Fig.5.2 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2, 2.5\text{m}$) 70

Fig.5.3 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$) 71

Fig.5.4 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2.5\text{m}$) 71

Fig.5.5 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5\text{mm}$, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2, 2.5\text{m}$) 72

Fig.5.6 Design limit for hot channel factor (EPRI correlation)
 (spiral rib, $D=9.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2, 2.5\text{m}$) 72

Fig.5.7 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$) 73

Fig.5.8 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$) 73

Fig.5.9 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$) 74

Fig.5.10 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$) 74

Fig.5.11 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$) 75

Fig.5.12 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$) 75

Fig.5.13 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$) 76

Fig.5.14 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$) 76

Fig.5.15 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, $D=8.5\text{mm}$, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$) 77

Fig.5.16 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	77
Fig.5.17 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	78
Fig.5.18 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	78
Fig.5.19 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	79
Fig.5.20 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	79
Fig.5.21 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	80
Fig.5.22 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	80
Fig.5.23 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	81
Fig.5.24 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	81
Fig.5.25 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	82
Fig.5.26 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	82
Fig.5.27 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=2\text{m}$)	83
Fig.5.28 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	83
Fig.5.29 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	84
Fig.5.30 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)	84
Fig.5.31 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	85
Fig.5.32 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	85
Fig.5.33 Design limit for hot channel factor (KfK correlation) (grid, D=10.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	86
Fig.5.34 Design limit for hot channel factor (EPRI correlation) (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)	86

Fig.5.35 Design limit for core height and linear heat rate (spiral rib, KfK correlation)	87
Fig.5.36 Design limit for linear heat rate (grid, KfK correlation)	87
Fig.5.37 Design limit for core height (grid, KfK correlation)	88
Fig.A1.1 Comparison of fuel pellet thermal conductivity	96
Fig.A1.2 Comparison of FP gas release models	96
Fig.A2.1 Standard subchannels	105
Fig.A2.2 Lumped subchannels	105
Fig.A2.3 Layout of lumped subchannels	106
Fig.A3.1 Sample JCL and data of GAPCON-THERMAL2-HC code	117
Fig.A4.1 Sample JCL and data of COBRA-HCLWR code	147

1. はじめに

高速炉の本格的導入が大幅に遅れることがほぼ確実となり、軽水炉時代の長期化が予想されている。この状況において、高転換軽水炉（HCLWR）は、核燃料の利用効率を向上させてウラン資源及び再処理プルトニウムの有効利用を図り軽水炉への柔軟な橋渡し役を果すものとして注目を集めている。近年、各国、各機関において、それぞれの立場から、高転換軽水炉の開発研究が積極的に進められている。^{1)~9)} 高転換軽水炉は、MOX燃料を使用し、冷却材と燃料の体積比を小さくして中性子スペクトルを硬化させることにより高転換率を実現しようとするものであり、このために、燃料棒格子配列を稠密化することが要求されている。

熱流力特性の観点からは、高転換率をめざすこと、すなわち炉心の稠密化を図ることは、炉心の冷却材領域の減少をもたらすこととなり、これは基本的に炉心冷却能力の低下を意味し、厳しい条件となる。従って、高転換軽水炉の成立性の検討には、熱流力的側面も極めて重要となる。各設計例をみても、核特性と同時に熱流力特性にも検討を加えているものが多い。^{1) 4) 6) 8)} 一方、M. Dalle Donne 等は、西ドイツの現用PWRプラントを基にした高転換軽水炉プラントに対して、熱流力及びプラント特性の観点から広くサーベイ計算を行い成立性の検討を行っている。^{3) 7)}

我々の研究室でも、核熱両面からの設計研究が進められ、核設計及び設計手法に関しては既にいくつかの成果が公表されている。^{5) 9)~13)} 本報告は、高転換軽水炉の熱流力特性の概要を把握し、炉心の成立範囲を明確にするために行った熱流力特性パラメータサーベイの結果をまとめたものである。対象とした高転換軽水炉プラントは、日本の現用100万kW_e級PWRプラントの炉心及びその周辺部のみを置換したものとした。パラメータサーベイでは単位セルモデルを用い、炉心パラメータとして、燃料ピン径、ピッチ、炉心高さ、線出力、ホットチャンネル因子を広範囲かつ独立に変化させ、燃料最高温度、最小DNBR、取り出し可能な炉心熱出力等を計算した。その結果に基づき、熱流力的に成立可能な炉心パラメータの範囲を求めた。また、使用した単位セルモデルの妥当性を検討するために稠密なHCLWR-J1炉心⁸⁾を対象に全炉心サブチャンネル解析を行った。

本研究は、高転換軽水炉解析用に新しく整備開発した、単位セルモデルによる熱流力特性及び燃料ピン特性解析コードGAPCON-THERMAL2-HC、及びサブチャンネル解析コードCOBRA-HCLWRを用いた。これらのコードに関しては、本報告書の第二章と第三章にその概要が記述されており、詳細及び使用法は付録に記述されている。

2. パラメータサーベイの方法

2.1 高転換軽水炉プラントモデル

2.1.1 概要

現用 100 万kw級 PWR プラントの炉心及びその周辺構造物のみを置換することにより、高転換軽水炉を設計する。したがって炉心以外の大部分は現用の仕様と変わらないものとする。基本とする PWR プラントの主要諸元を Table 2.1 に示す。

(1) 圧力容器

4 ループ PWR の圧力容器を考える。炉内の構造物の内、上部、下部炉心板間隔やコアバレル、遮蔽体の寸法は、炉心の高さ直径に応じて変わるものとする。また、そのサイズは以下の通りである。

内 径 : 4,400 mm

全 高 : 12,900 mm

ホットレグ内径 : 773 mm

コールドレグ内径 : 700 mm

(2) 一次冷却材配管及び一次冷却材ポンプ

今回の計算では必要ないので詳細は省略する。ただし、ポンプの Q-H 特性は次式で与えられるものとする。

$$H_T = A Q + B$$

ここで、 H_T : ポンプ揚程 (m)

Q : 体積流量 (m^3/s)

A, B : 現用 PWR プラントで使用されているポンプ特性から決定される定数で

$$A = -23,163 \text{ s/m}^3, B = 192.69 \text{ m}$$

但し、上式の係数 A 及び B は文献 28 の図より読み取った値である。また、一次系の全圧損は同図より約 6 kg/cm^2 で、そのうち炉心部における圧損は約 30% である。

(3) 蒸気発生器

蒸気発生器の主要パラメータを Table 2.2 に示す。

2.1.2 炉心モデル

(1) 燃料ピン

燃料は $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ で、Pu の富化度 7~8 w/o とする。その理論密度は 95% であるがペレットのディッシュ等を考えて 93% とする。被覆管は、スペーサーとしてスパイラルリブを使用する場合は肉厚 0.4 mm の SUS 304 とする。なお、リブの幅は 0.4 mm とした。

グリッドを使用する場合は肉厚 0.57 mm のジルカロイを使用する。ペレットと被覆管とのギ

チップ幅は未照射時に 0.17 mm (直径表示) とする。ガスプレナムは上部に設ける。

(2) 燃料集合体

燃料ピンは三角格子を形成し、一集合体当たり 271 本または 331 本の燃料ピンから構成される六角集合体となる。ラッパー管はなく必要ならば外周にバンドをつけるものとする。

燃料集合体の構成は以下の通りとする。

集合体ピン数 :	331	271
燃料ピン数 :	313	259
制御棒本数 :	12	12
その他(支持棒) :	6	0

(3) 炉心サイズ

炉心サイズ(高さと直径)はパラメータとなるが現用 PWR 圧力容器内に収まることを条件とする。但し、場合によっては直径は大きくなって良いものとする。炉心は六角集合体から構成され、可能な限り円筒に近く、かつ 1/6 対称を有するものとする。

(4) 軸方向ピッチとグリッド数

スパイラルリブスパーサーの場合、軸方向ピッチの設定によって炉心圧損、DNBR に少なわず影響が現われる。軸方向ピッチを小さくした場合、限界熱流束は増大し、かつ炉心の圧損も増加するという傾向を有する。本パラメータサーベイでは各種文献¹⁴⁾及び圧損を保守的に評価することを考慮して、軸方向ピッチは 20×燃料ピン直径と設定した。

グリッドスパーサーの場合には、炉心の稠密化を考慮に入れてグリッド間隔を現用 PWR のものよりいくぶん減少させ 30 cm から 40 cm の範囲に収まるように以下のように設定した。

炉心高さ L_c (m)	グリッド数	グリッド間隔 (cm)
2.0	9	33.3
3.0	12	"
3.5	13	34.6

2.1.3 炉心パラメータとその範囲

変化させたパラメータとその範囲は以下の通りである。

ピン直径, D (mm) : 8.5 ~ 10.5

ピッチ, P (mm) : 9 ~ 14

P/D : 1.1 ~ 1.4

炉心高さ, L_c (m) : 2.0 ~ 3.5

スパーサー : スパイラルリブ/グリッド

平均線出力密度, q_L (kw/m) : 16 ~ 20

ホットチャンネル因子, $F_{\Delta H}$: 1.5, 1.6, $F_{\Delta H}^S$

ここで $F_{\Delta H}^S$ はホットチャンネル出口で冷却水の温度が飽和温度になるようなホットチャンネル因子である。その他の主要パラメータは現用 100 万 kw_e 級 PWR プラントを基に以下の値に固定した。

炉心熱出力 :

原子炉容器出口温度 : 325 °C
 バイパス流量割合 : 5 %
 炉心運転圧 : 158 kg/cm²G
 最大プラント過負荷 : 1.12
 軸方向出力分布 : ピーク値 / 平均 = 1.55 の cosine 分布

2.2 解析方法

2.2.1 単位セルモデル

本パラメータサーベイにおいて、炉心部は一本の燃料ピンとその周りの一次元的な流れから成る単位セルで代表されている。従って、本計算における単位セルは Fig.2.1 に示すような二つのサブチャンネルより成る系である。DNBR や燃料最高温度等のホットチャンネルに対する計算では、正味流入量を現用 PWR の設計と同様に上記単位セルに対して求めた流量（平均流量）の 5% 減と仮定している。

2.2.2 炉心圧損、冷却材流量及び冷却材温度

炉心圧損、冷却材流量及びその温度は以下のように計算される。

(1) 一次冷却系流量

一次冷却系流量は以下の Q-H 特性から算出する。

$$H_T = -23.163 Q + 192.69$$

$$Q = \frac{M}{4 \rho_{in}} \times \frac{1}{3600}$$

$$H_T = H_C + H_{R,0} \left(\frac{M}{M_0} \right)^2 \frac{\rho_{in,0} \rho_{av,0}}{\rho_{in} \rho_{av}}$$

ここで、 H_T : ポンプ揚程 (m)

H_C : 炉心圧損 (m)

$$\rho g H_C = \Delta P_C (P_a), \quad \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

H_R : 炉心以外の圧損 (m)

Q : ポンプ 1 台当りの体積流量 (m³/s)

M : 冷却材全流量 (kg/h)

ρ : 冷却材密度 (kg/m³)

但し、添字なしの ρ は ΔP_C と H の換算のための一気圧、4 °C の密度である。

であり、各添字 in, av, 0 はそれぞれ炉心（圧力容器）入口、一次系平均、現用 PWR プラントにおける値を示すものとする。従って以下の式で計算される。

$$T_{av} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$$

$$\rho_{av} = f_l (T_{av})$$

ここで T_{out} は圧力容器出口温度であり f_l は飽和蒸気表より内挿により決定されることを示している。本計算では

$$H_{R,0} = 42 \text{ m (42 k}\alpha/\text{cm}^3)$$

$$T_{in,0} = 552.2 \text{ }^\circ\text{F} = 289 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{av,0} = 584.6 \text{ }^\circ\text{F} = 307 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$M_0 = 60.1 \times 10^6 \text{ k}\alpha/\text{h}$$

と固定している。なお上述の Q-H 特性の表式では、揚程と圧損が

$$\rho g H = \Delta P \quad (\rho = 1000 \text{ kg/m}^3)$$

で表わされるとしていることを注意する必要がある。また、本計算モデルでは、現用 PWR プラントを基準にして、炉心圧損が二倍になると一次系流量は約10%減少する。

(2) 炉心入口及び出口温度

圧力容器出口温度 T_{out} は $325 \text{ }^\circ\text{C}$ に固定されており、炉心入口温度は圧力容器入口温度と等しいと仮定できるので、炉心入口温度 T_{in} 及び出口温度 $T_{c,out}$ は以下の式より計算できる。

$$H_{in} = H_{out} - \frac{Q_T}{M}$$

$$Q_T = Q_{T,0} \cdot Q_r$$

$$T_{in} = f_l (H_{in})$$

$$T_{c,out} = T_{in} + \frac{T_{out} - T_{in}}{W_r}$$

ここで、 Q_T 、 Q_r : 炉心出力及び出力減少割合

H_{out} : 圧力容器出口エンタルピー

H_{in} : 圧力容器入口エンタルピー

M : 一次系流量

W_r : 炉心流量割合

f_l : 飽和蒸気表

これより、炉心平均温度は

$$T_{avc} = \frac{T_{in} + T_{c,out}}{2}$$

とする。

(3) 炉心圧損

炉心圧損は Fig. 2.1 に示した単位セルに対して炉心（セル）平均温度 T_{avc} における物性値を用いて計算する。炉心冷却材流量は一次系流量からバイパス流量を除いた $M \cdot W_r$ であり、燃料ピン（単位セル）総数 N_T は

$$N_T = \frac{Q_T}{q_L \cdot L_C}$$

ここで、 q_L ：平均線出力

L_C ：炉心高さ

従って単位セルを流れる流量 M_{cell} と重量流速 G は、それぞれ

$$M_{cell} = \frac{M \cdot W_r}{N_T} = \frac{M \cdot W_r \cdot q_L \cdot L_C}{Q_T}$$

$$G = \frac{M_{cell}}{A}$$

ここで、 A は単位セル流路面積であり、スパイラルリブスパーサー及びグリッドに対して次のように計算する。

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} P^2 - \frac{\pi}{4} D^2 - 3(P-D)b \quad (\text{スパイラルリブ})$$

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} P^2 - \frac{\pi}{4} D^2 \quad (\text{グリッド})$$

ここで、 b はリブの幅であり 0.4 mm に固定している。また、水力等価直径 D_e はそれぞれ

$$D_e = \frac{4A}{\pi D + 6(P-D)} \quad (\text{スパイラルリブ})$$

$$D_e = \frac{4A}{\pi D} \quad (\text{グリッド})$$

で定義される。

炉心圧損としては、入口形状損失、グリッドによる損失及び壁摩擦による損失を考慮しているが、それは以下のように計算される。その他の加速損失及び重力による損失も比較のために計算している。

スパイラルリブを使用する炉心

$$\Delta P_c = \left(K_i + \frac{fL}{D_e} \right) \frac{\rho_{avc} u^2}{2}$$

ここで、 K_i ：入口圧損係数（本計算では $K_i = 1.2$ ）

L ：炉心高さ L_C + プレナム長

f : スパイラルリブの摩擦係数

f は Rehme の式^{3),15)}を用いて次のように計算する。

$$f = F f'$$

$$F = \left(\frac{P}{D}\right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{(P/D)^3}{(H/D)}\right]^{2.16}$$

$$f' = \begin{cases} C \times 0.1317 \times (Re')^{-0.17} & Re' \geq 1.9 \times 10^4 \\ C \times \left\{ 0.1317 \times (Re')^{-0.17} + \frac{60}{Re'} - 3.2 \times 10^{-8} \right\} & 20 \leq Re' < 1.9 \times 10^4 \end{cases}$$

$$Re' = Re \sqrt{F} \quad (Re : \text{レイノルズ数})$$

$$C = \begin{cases} 1 & P/D \geq 1.03 \\ 1.6 - \exp\left(-\frac{P/D-1}{0.05873}\right) & 1 \leq P/D < 1.03 \end{cases}$$

水の物性値としては T_{avc} における値を用いる。

グリッドを使用する炉心

$$\Delta P_C = \left(K_i + \frac{f L}{D_e} + n_G C_v \epsilon^2 \right) \frac{\rho_{avc} u^2}{2}$$

上式で右辺第一項、第二項、第三項はそれぞれ、入口形状損失、スムーズパートの摩擦損失及びグリッドによる圧損を示している。 n_G はグリッド数であり、 $K_i = 1.2$ に固定している。

f は Prandtl-Nikuradse の関係に基づいて以下のように計算する。³⁾

$$f = \lambda_{TS} \cdot C_s$$

$$\lambda_{TS} = \frac{1}{[2 \log (Re \sqrt{\lambda_{TS}}) - 0.8]^2}$$

$$C_s = \left[1 - \exp\left(-\frac{P/D-1}{0.0265}\right) \right] \cdot \left[1.036 + 0.054 \left(\frac{P}{D} - 1\right) \right]$$

グリッドによる圧損係数は Rehme¹⁵⁾による C_v と流路閉塞率 ϵ によって表現され、それぞれ、文献3及び15と現用 PWR の圧損より評価した以下の式を用いている。

$$C_v = 12$$

$$\epsilon = 0.6957 - 95.39 (P-D)$$

但し、上式の P および D は m 単位で与えられる。本式は文献3と比較し数倍の圧損を与えるものである。

加速損失と重力による損失

加速損失 ΔP_{acc} と重力による損失 ΔP_{el} は以下の式で計算する。

$$\Delta P_{acc} = G^2 \left(\frac{1}{\rho_{c,out}} - \frac{1}{\rho_{in}} \right)$$

$$\Delta P_{el} = \rho_{avc} g L$$

これらを含めた炉心圧損 ΔP_{ct} は

$$\Delta P_{ct} = \Delta P_c + \Delta P_{acc} + \Delta P_{el}$$

2.2.3 DNBRの計算

DNBRの解析には COBRA-III¹⁶⁾ の計算法をパラメータサーベイ計算用に簡略化して、GAPCON-THERMAL2 コードに組み込み、Fig. 2.1 に示す単位セルモデルで評価した。この場合、ホットチャンネルの正味流量は、現用 PWR の設計と同様に平均流量を 5% 減少させるものとした。

(1) 水平方向出力分布

ホットチャンネル因子 (F_{JH}) として、変化させるパラメータに含んでいる。その値としては、 $F_{JH} = 1.5, 1.6, F_{JH}^S$ の三点を選んだ。ここで、 F_{JH}^S とは、ホットチャンネル出口温度が系の飽和温度となるという条件から決定される値であり、炉容器入口・出口温度から、次式で算出される。

$$T_{hot} = T_{in} + F_{JH}^S (T_{out} - T_{in}) = T_s(P)$$

ここで、 T_{in} : 入口温度

T_{out} : 出口温度

T_{hot} : ホットチャンネル出口温度

$T_s(P)$: 飽和温度 (159 kg/cm² では約 345.2 °C)

(2) 軸方向出力分布

軸方向出力分布は、最大と平均の比が 1.55 の chopped cosine 分布を仮定する。

(3) DNB 相関式

DNB 相関式としては、主に KfK 相関式¹⁴⁾ を使用した。また、比較のために EPRI 相関式¹⁾ による評価も行った。これらの相関式の適用範囲を Table 2.3 に示す。

KfK 相関式¹⁴⁾

$$\phi_{CHF} (10^6 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft}^2) = \frac{A + B \Delta H_i}{C + Z Y}$$

$$A = \frac{0.25 \cdot G \cdot D \cdot \lambda \cdot F_1 \cdot Q_1}{1 + Q_2 \cdot F_2 \cdot G \cdot D}$$

$$B = 0.25 \cdot G \cdot D$$

$$C = C' V \left[1 + \frac{Y-1}{1+G} \right]$$

$$C' = \frac{Q_4 \cdot F_3 (G \cdot D)^{1/2}}{D_e}$$

ここで、 $D = D_e \cdot F_P$ (D_e は水力等価直径)

$F_P = \phi_P / \bar{\phi} =$ 熱流束の径方向ピーキング因子

$P_r = 10^{-3} p$ (p は系の圧力 (psia))

$$F_1 = P_r^{0.982} \exp(1.17(1 - P_r))$$

$$F_2 = P_r^{0.841} \exp(1.424(1 - P_r))$$

$$F_3 = P_r^{1.851} \exp(1.241(1 - P_r))$$

G : 質量流速 ($10^6 \text{ lb/ft}^2 \text{ h}$)

λ : 蒸発潜熱 (Btu/lb)

$4H_i$: 入口サブクーリング (Btu/lb)

Z : 入口からの距離 (in)

$$Y = \frac{1}{Z} \int_D^Z \bar{\phi}(z) dz / \bar{\phi}(z)$$

V : グリッドスペーサーパラメータ

$$Q_1 = 1.748$$

$$Q_2 = 7.540$$

$$Q_4 = 8.783$$

グリッドスペーサーパラメータ V は、スパイラルリブ及びグリッドに対して以下の式で算出される。

$$V = 1 - 2.6695 (F^{0.915} - 1) \times [0.336 + 0.09 G - 0.697 \exp(-2.68 G)]$$

$$F = \left(\frac{P}{D} \right)^{0.5} + \left(7.6 \frac{(P/D)^3}{(H/D)} \right)^{2.16} \quad (\text{スパイラルリブ})$$

$$V = -0.252 - 2.789 \exp(-3.874 G) + 1.915 \exp(-0.234 G) \quad (\text{グリッド})$$

B&W-VPI&SU(EPRI) 相関式¹⁾

グリッド及びスパイラルリブ双方に対して以下の式を用いる。

$$\phi_{CHF} (10^6 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2)$$

$$= A_1 \left(\frac{D \cdot G}{h_z - h_i} \frac{\partial h}{\partial z} \right)^{A_2} + A_3 \left(\frac{D \cdot G}{h_z - h_i} \frac{\partial h}{\partial z} \right)^{A_4} \left[A_5 \Delta H_i + \frac{\partial h_f}{\partial \rho} (2000 - \rho) \right]$$

ここで, D : heated perimeter に基づく水力等価直径 (in)

G : ローカル質量流束 ($10^6 \text{ lb/h} \cdot \text{ft}^2$)

h_z, h_i : 冷却材エンタルピーと入口エンタルピー (Btu/lb)

$\frac{\partial h}{\partial z}$: ローカルエンタルピーグラディエント (Btu/lb · in)

ΔH_i : 入口サブクーリング = $h_f - h_i$

h_f : 飽和水エンタルピー (Btu/lb)

p : 系の圧力 (psia)

$$\frac{\partial h_f}{\partial \rho} = 0.123$$

$$A_1 = 2.8591$$

$$A_2 = 0.51796$$

$$A_3 = 0.023018$$

$$A_4 = 0.63960$$

$$A_5 = 1.2614$$

2.2.4 燃料温度解析

燃料温度の解析には, 寿命中の燃料ピンの照射挙動を追跡することができる GAPCON - THERMAL2 コード¹⁷⁾を用いた(実際には, DNBR 計算を組み込んだ GAPCON - THERMAL2 - HC コードを用いた)。本コードによる計算では以下の現象を考慮している。

- ・ギャップコンダクタンスの変化
- ・核分裂生成ガスの生成と放出
- ・ペレットの熱膨張, 弾性変形等
- ・燃料の再組織化

径方向及び軸方向出力分布は DNBR の解析と同様とした。本計算に用いた物性値及びモデルの概要は付録 1 に示した。

2.2.5 二次系の特性による熱出力減少割合

高転換軽水炉では格子が稠密化されているために炉心圧損が増加する。その結果, 冷却材流量が減少し, 炉心出口温度を現用 PWR と同じにするために炉心入口温度を低下させる。炉心入口温度の低下は, 蒸気発生器からの一次側の出口温度の低下を意味する。その結果, 二次系の蒸気温度及び圧力が低下し, 蒸気密度が減少する。現用 PWR プラントと同じタービンを使用しているためにタービン出力が低下し, この低下は, 原子炉熱出力の低下によって補なわなければならない。本計算では, タービン出力の低下が, 二次系蒸気圧力の低下に比例すると仮定する³⁾ことにより,

熱出力減少割合を以下の手順によって評価する。

二次系蒸気圧力を P_S , その低下率を K とすると,

$$P_S = K P_{S,0}$$

ここで, 添字 0 は現用 PWR での値を表わしている。炉心熱出力 Q_T は上述の仮定によって次のようになる。

$$Q_T = K Q_{T,0}$$

蒸気発生器伝熱特性は次式で表わされる。

$$Q_N = U A \Delta \theta$$

$$\Delta \theta = \frac{T_h - T_c}{\ln \frac{T_h - T_s}{T_c - T_s}}$$

ここで, Q_N : 一蒸気発生器当りの原子炉熱出力 = $\frac{Q_T}{4}$ (W)

U : 総括熱貫流係数 (W/m²°C)

$\Delta \theta$: 対数平均温度 (°C)

A : 蒸気発生器伝熱面積 (m²)

T_h : 一次冷却材高温側温度 = T_{out} (°C)

T_c : 一次冷却材低温側温度 = T_{in} (°C)

T_s : 蒸気温度 (°C)

上式より,

$$T_s = T_c - \frac{T_h - T_c}{\exp \left(\frac{U A (T_h - T_c)}{Q_N} \right) - 1}$$

となり, 二次系蒸気圧は

$$P_S = P_S (T_S)$$

一方, 総括熱貫流係数 U は, 炉心を PWR から高転換軽水炉心に変更することによって起こる一次系冷却材条件の変化の結果,

$$U = U_0 \frac{1}{\left\{ 0.2 \times \left(\frac{M_0}{M} \right)^{0.8} + 0.6 + 0.1 \times \left(\frac{Q_N}{Q_{N,0}} \right)^{0.25} + 0.1 \right\}}$$

となる。熱出力が Q_T の時の一次系冷却材条件は, 第 2.2.2 節の手順で計算される。以上の式を同時に満足する K を求めることにより, 炉心熱出力減少割合が決定される。

本計算に用いた $Q_{T,0}$, M_0 , U_0 , $P_{S,0}$ 及び A の値は Table 2.2 に示されている。

2.2.6 計算コード：GAPCON-THERMAL2-HC

本パラメータサーベイ計算には、GAPCON-THERMAL2 コードを基に、DNBR 解析用に COBRA-ⅢC を簡略化したルーチンを組み込むとともに、上述の機能（ポンプ特性、蒸気発生器特性、圧損評価等）を追加したコード GAPCON-THERMAL2-HC を用いた。本コードの使用法は付録 3 に示した。

2.3 封入ヘリウム圧とプレナム長の決定

熱流力特性パラメータサーベイを始めるにあたって、初期封入ヘリウム圧とプレナム長を決定する必要がある。本研究では、2.2 節で述べた GAPCON-THERMAL2-HC コードを用い予備的サーベイ計算を行い、その結果に基づいて、炉心パラメータ（ピン径、炉心高さ、線出力密度等）に依らず、一意的に封入ヘリウム圧及びプレナム長を決定した。

燃料の設計制限としては次の二つを考えた。

- ① 燃料最高温度 ($T_{f \max}$) が溶融温度を越えない。
- ② 最終プレナム内圧 (P_{res}) が制限値を越えない。

燃料溶融温度は、未照射時 2550 °C、50 GWd/t 燃焼時 2390 °C である。最終プレナム内圧の制限値は、被覆管にかかる引張応力が SUS 304 の耐力以下であるという条件より、以下のように算出した。

$$P_{\max} = \frac{2 \sigma t}{D} \times 100$$

ここで、 P_{\max} : 制限内圧 (kg/cm²)
 σ : 円周方向応力 (kg/mm²)
 t : 被覆管肉厚 (mm)
 D : 被覆管外径 (mm)

SUS 304 の Su 値は 325 °C で約 40 kg/mm²²⁵⁾ であるから、 $\sigma = 13.3 \text{ kg/mm}^2$ 、また、 $t = 0.4 \text{ mm}$ 、 $D = 10.5 \text{ mm}$ とすると P_{\max} は約 102 kg/cm² (約 100 atm) となる。

目標到達燃焼度（平均的単位セル）は 35 GWd/t とした。本サーベイ計算では、ホットチャンネル因子は、沸騰条件より決定される F_{DH}^S に設定した。従って、本計算ではホットチャンネル因子は炉心パラメータに依存して 1.5 ~ 1.6 の範囲の値となっている。GAPCON-THERMAL2-HC コードでは、プレナム内圧、燃焼温度等をホットチャンネルに対して計算していることから、最大取り出し燃焼度は $35 \times 1.5 \sim 1.6 \text{ GWd/t}$ となっている。これは、標準的な高転換軽水炉における平均取り出し燃焼度と最大取り出し燃焼度の比が約 1.2⁹⁾ であることを考慮すると、目標平均取り出し燃焼度 43 ~ 47 GWd/t に対応している。

サーベイ計算の結果を Fig. 2.2 ~ 2.8 に示す。Fig. 2.2 はプレナム長 (L_p) をパラメータとして、封入ヘリウム圧と燃料最高温度 ($T_{f \max}$)、ピン内圧 (P_{res}) の関係を示している。 $T_{f \max}$ は封入ヘリウム圧及びプレナム長にはそれほど影響されず、いずれの場合も 1900 °C 以下であり、112% 過負荷時を考慮しても溶融点以下と考えられる。一方、ピン内圧は、相方に大き

く依存し、封入ヘリウム圧及びプレナム長の決定には、こちらが支配的因子となっている。この熱流条件（図中に表示）では、封入ヘリウム圧 10 atm でプレナム長約 68 cm, 20 atm で約 81 cm が必要である。なお、本図の計算で F_{DH} の変化は 1% 以下であり、約 $F_{DH} = 1.53$ となっている。

線出力をパラメータとして示したのが Fig. 2.3 である。この場合、線出力が 2 kw/m 増加することにより、 F_{DH} は約 1% 減少しているが、 $T_{f \max}$ は約 150 °C 上昇する。

Fig. 2.4 は炉心高さをパラメータとした場合である。この場合、高さが低いほどピン積算出力が小さくなり生成 FP 量も小さくなるのでピン内圧は低くなる。逆に $T_{f \max}$ に関しては、ホットチャンネルの出力密度が増加（沸騰条件より F_{DH} が大きくできる）するので、炉心高さが低い時が厳しくなる。ちなみに、 F_{DH} は炉心高さ 2 m 及び 3 m でそれぞれ 1.58 と 1.49 である（プレナム長依存性は小さい）。2 m から 3 m とすることにより、ピン内圧は約 15 atm 増加し、 $T_{f \max}$ は約 100 °C 低下する。

Fig. 2.5 はピンピッチをパラメータとした場合である。ピン径が同一ならば、ピッチが大きい方が炉心圧損が小さくなり単位セル当りの冷却水流量が増加するので F_{DH} を大きくとることが可能である。従って、ホットチャンネルの $T_{f \max}$ 及びピン内圧は増加する。ピッチが 11 mm から 12 mm に増加することによって F_{DH} は約 1.53 から 1.61 に増加している。

Fig. 2.6 はピン径をパラメータとした場合である。この効果は F_{DH} に関してピッチと逆になっている。しかしながら燃料ピンの出力密度（線出力密度ではない）が同時に変わるために、 $T_{f \max}$ 及びピン内圧への影響はピッチを変える場合よりも大きい。 F_{DH} は $D = 8.5$ mm, 9.5 mm に対して、それぞれ、約 1.59 と 1.53 となっている。

プレナム長を変えた時の冷却材熱流特性への影響を Fig. 2.7 と 2.8 に示す。Fig. 2.7 から、最小 DNBR と沸騰条件により決まる F_{DH} はプレナム長にほとんど影響されないことがわかる。全圧損 (ΔP_T) と炉心平均流速 (U_m) については、プレナム長を 50 cm から 100 cm にした場合約 5% の影響がみられる。

以上のパラメータサーベイの結果に基づいて、封入ヘリウム圧及びプレナム長を以下のように設定した。

① 封入ヘリウム圧は 10 atm とする。

Fig. 2.4 から、ヘリウム圧が低いほど燃料ピン内圧が低くなり良好な傾向がみられる。しかしながら、10 atm 以下にした場合、 $T_{f \max}$ の増加、PCMI の影響、被覆管のクリープ歪の影響が無視できなくなることが予想される。

② プレナム長は 1 m とし、上部に置く。

上記の値に設定した理由は以下の通りである。

- i) プレナム内圧はプレナム長の設定からではなくプレナム体積から決まる。従って、より細径ピン、より高い炉心長の場合にそなえて余裕分が必要である。
- ii) 到達燃焼度（平均単位セル）を 35 GWd/t から 45 GWd/t にする場合、プレナム長 1 m では約 18 kw/m まで線出力を増加できる。

$$\begin{aligned}
 q_L = 16 \text{ kw/m, } B_u = 35 \text{ GWd/t, } L_p = 1 \text{ m} &\rightarrow \text{約 } 68 \text{ atm} \\
 B_u = 45 \text{ GWd/t} &\rightarrow \text{約 } 85 \text{ atm} \\
 B_u = 45 \text{ GWd/t} &\rightarrow \text{約 } 105 \text{ atm}
 \end{aligned}$$

本計算では、燃料ペレットと被覆管のギャップは現用PWRと同じ0.085 mmとして、FPガス放出式は付録1に示した式を用いていた。Fig.2.9に、ギャップ幅とFP放出式の影響を示した。本図上部がFP放出式の比較で、—・—が本解析を使用した放出式の場合で、…▽…は高速炉の設計に用いられた式²⁶⁾

$$F(x) = 30.1 + 1.880 X - 0.01804 X^2 + 7.828 \times 10^{-5} X^3 \quad (X < 70)$$

$$F(x) = 100.0 \quad (X \geq 70)$$

F(x) : 放出率(%)

X : 燃料要素平均燃焼度(MWd/t)

を用いた場合である。本図下部は、ギャップ幅を0.1 mm(—×—)から文献1にみられる0.003 in(0.076 mm)とした場合の変化を示している。なお、0.085 mmの場合を・で示した。本図からわかるように、ギャップ幅、FP放出式ともに、 $T_{f \max}$ 及びピン内圧に大きな影響を与えることから、詳細設計では両者に十分注意を払う必要がある。

Table 2.1 Specification of 1100 MWe PWR plant

Output		
Thermal output	3,423	MWt
Electric output	1,183	MWe
Thermal efficiency	34.6	%
Coolant		
System pressure	157	kg/cm ²
Inlet temperature	289	°C
Outlet temperature	325	°C
Total flow in primary loop	60.1	Gg/h
Core		
Active core length	3.66	m
Equivalent core diameter	3.37	m
Average linear heat rate	183	W/cm

Table 2.2 Specification of steam generator

Reactor thermal output	3423	MWt
Heat transfer area	4780	m ²
Overall heat transfer coefficient	5.9×10^3	kcal/m ² h°C
Primary loop flow rate	60.1×10^6	kg/h
Secondary loop steam pressure	62.5	kg/cm ²
Secondary loop steam temperature	277	°C

Table 2.3 DNB correlation

Correlation Ref.	De (clearance) (mm)	Range of application (data base) P (kg/cm ²)	G (Gg/h/m ²)	X or ΔTsub (ΔTsub)	Geometry (Spacer)
KfK	1 2.28-6.6 (0.38-2.29)	84.4-140.6	0.24-20.0	-0.45-0.96	Triangular lattice Spiral, grid, ferrule
B&W-VPI&SU (EPRI)	2 3.61-21.6 (1.5-2.3)	84.4-170.5	4.9 -20.5	17-244 C (ΔTsub)	Triangular and square lattice Grid

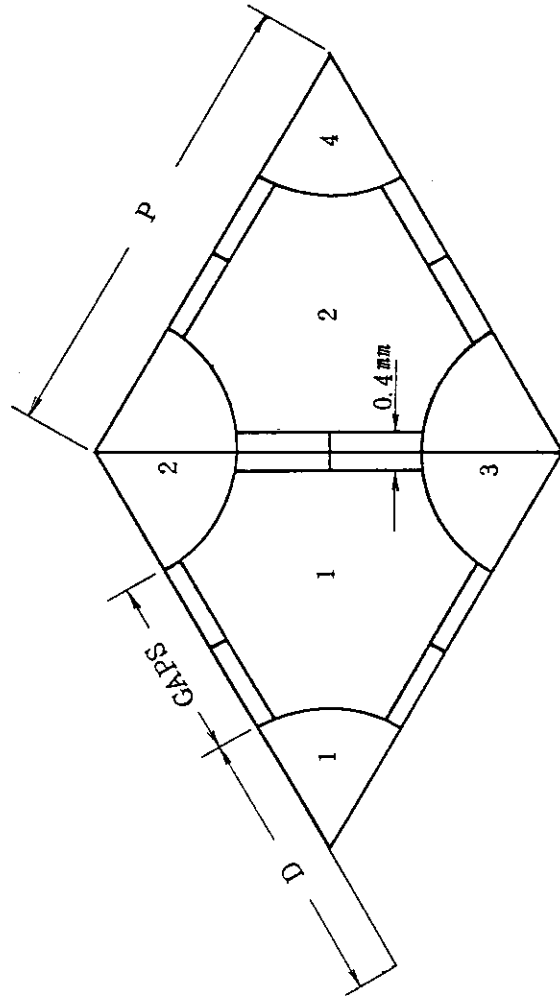


Fig.2.1 Unit cell with spiral rib spacer

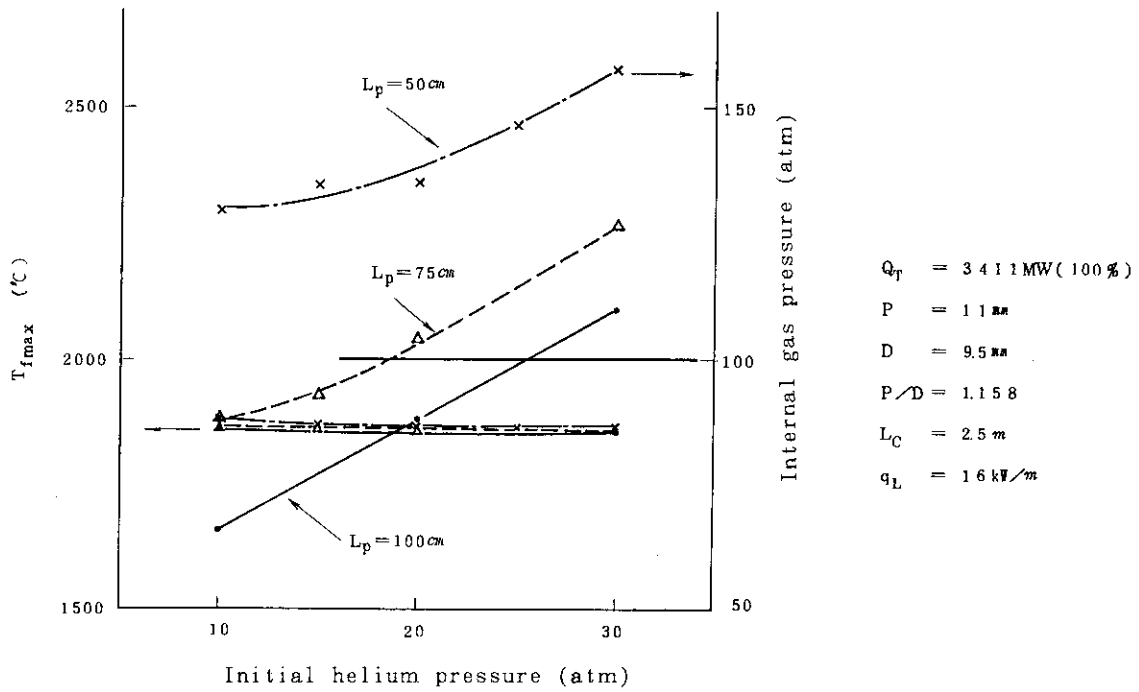


Fig.2.2 Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. initial helium pressure (parameter : plenum length)

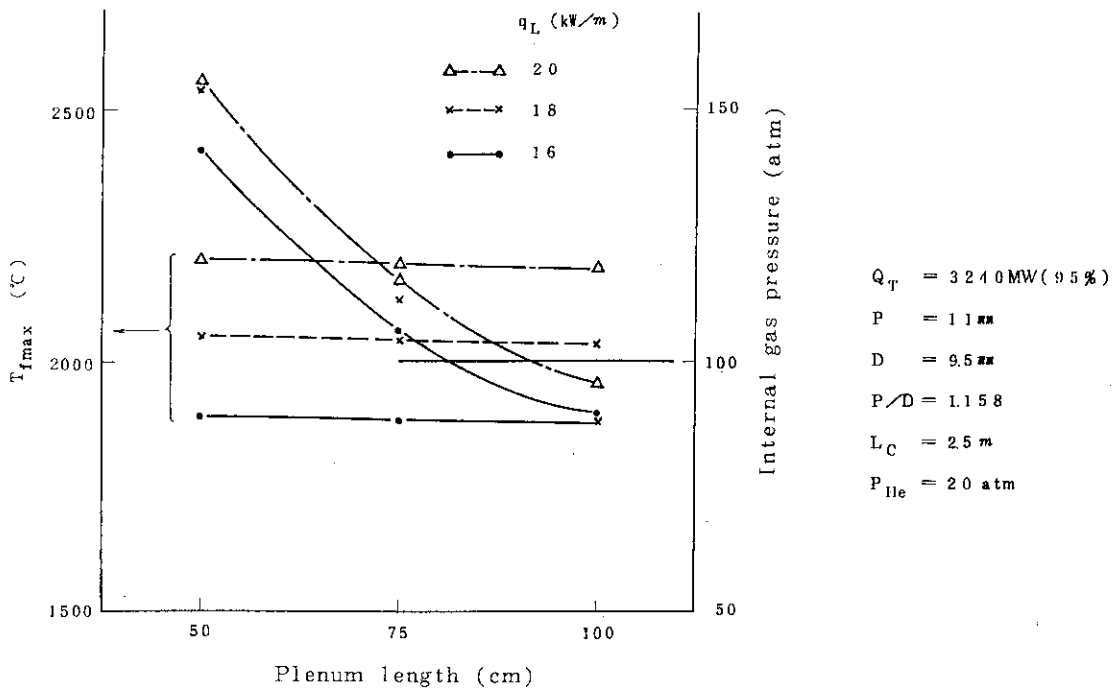


Fig.2.3 Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : linear heat rate)

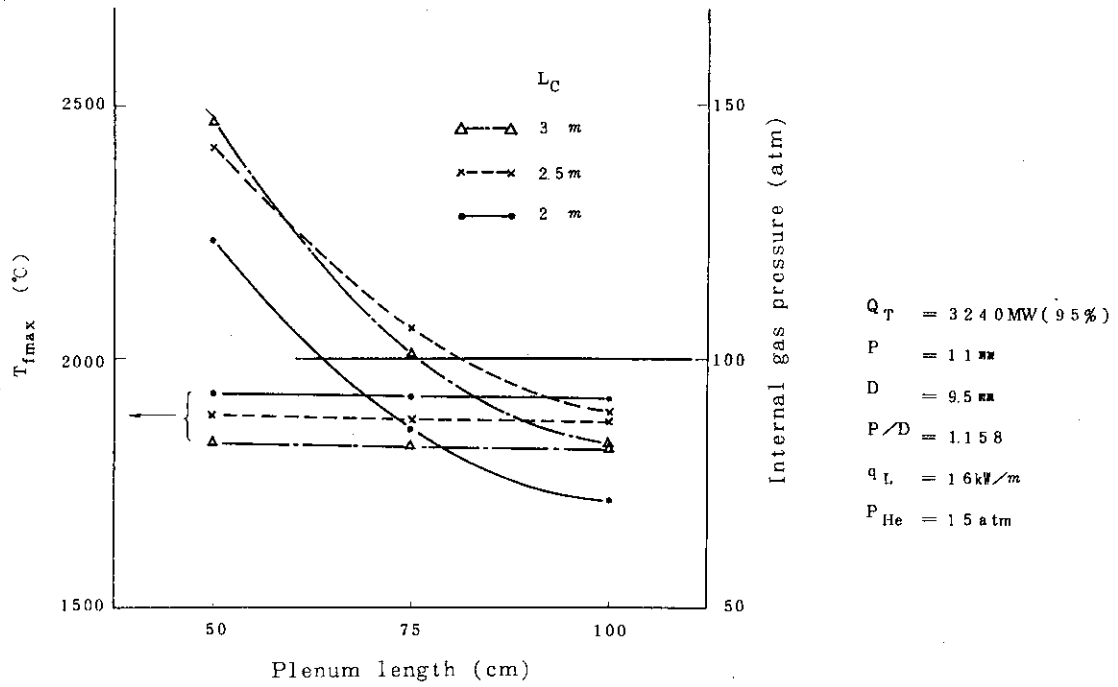


Fig.2.4 Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : core height)

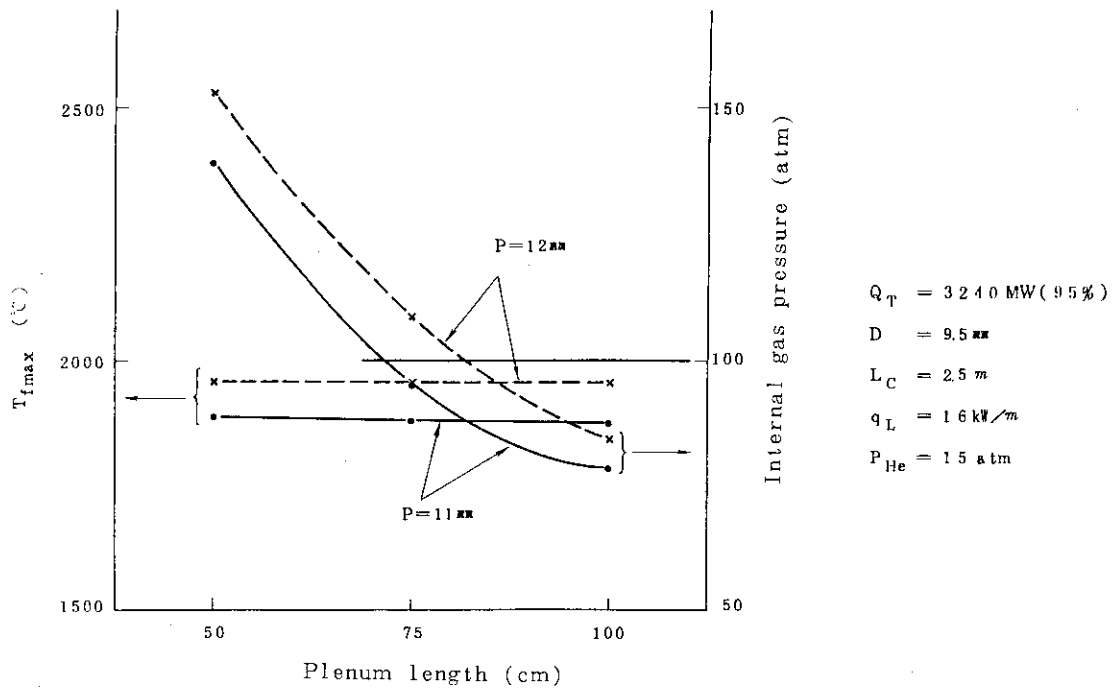


Fig.2.5 Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : pin pitch)

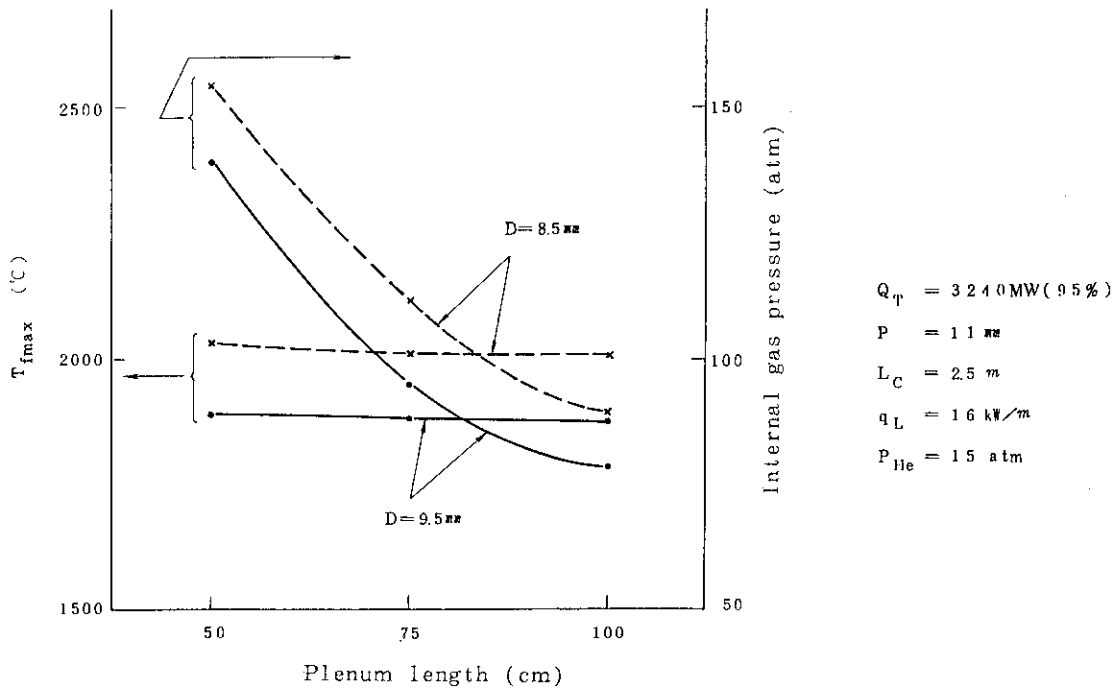


Fig.2.6 Maximum fuel temperature and internal gas pressure vs. plenum length (parameter : pin diameter)

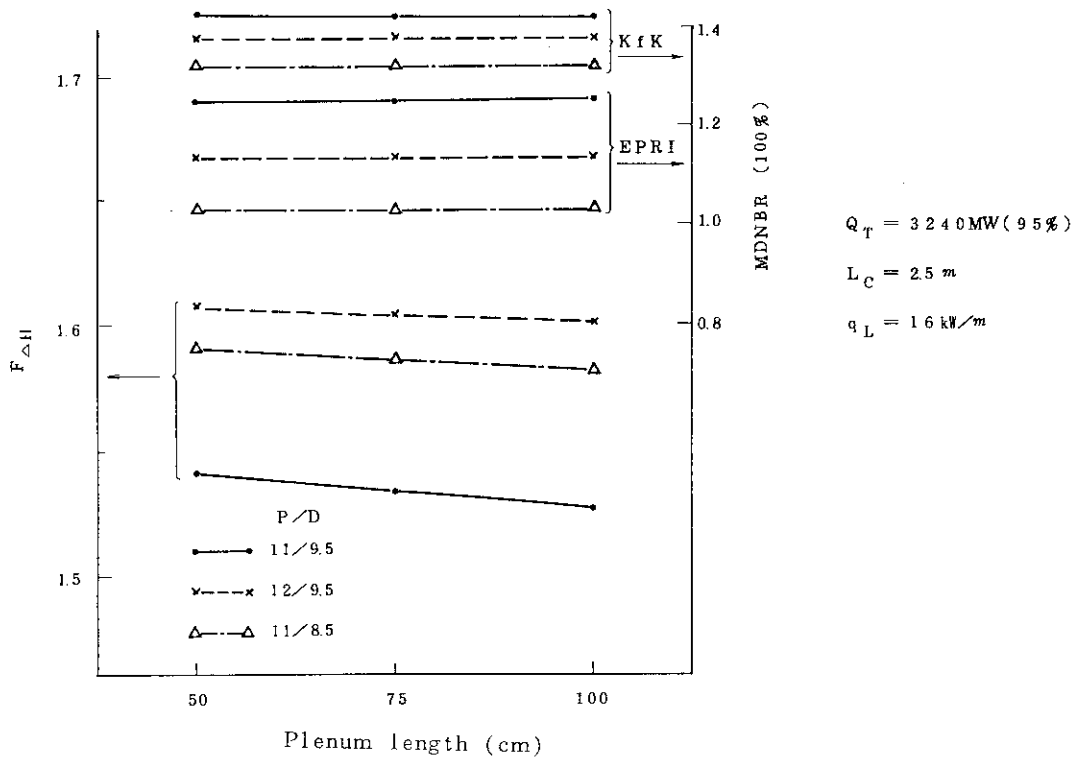


Fig.2.7 $F_{\Delta H}^S$ and minimum DNBR vs. plenum length

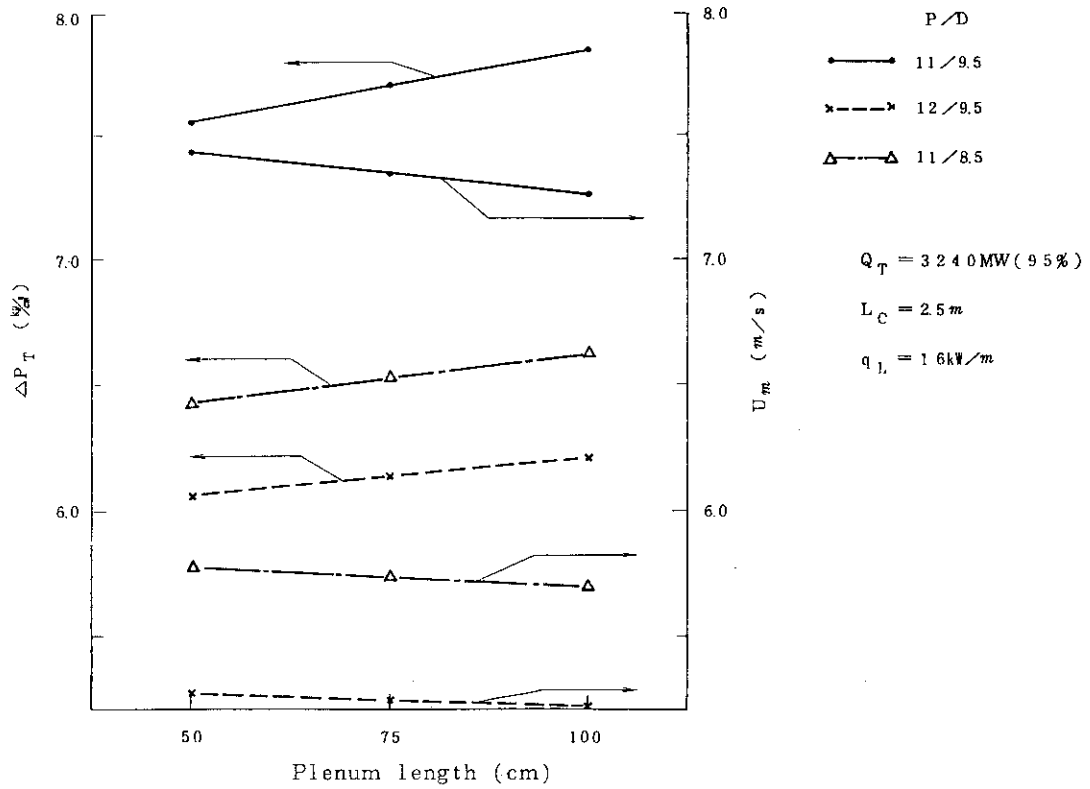


Fig.2.8 Pressure drop and average velocity vs. plenum length

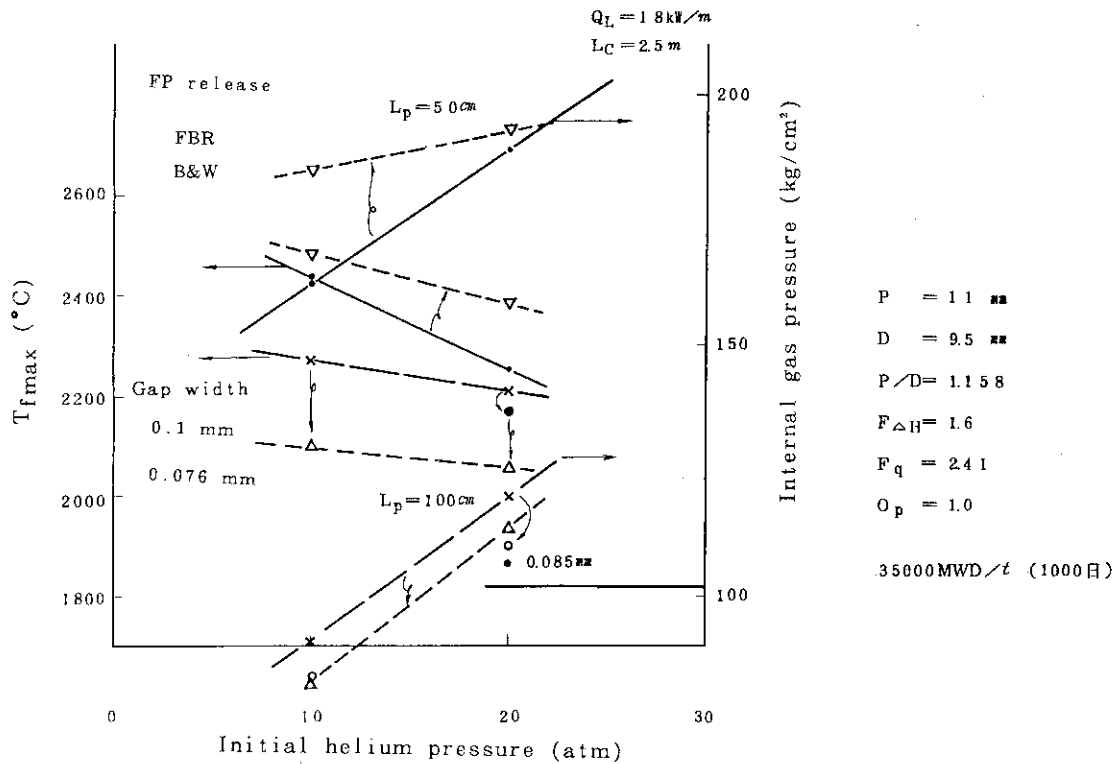


Fig.2.9 Effect of gas release models and gap widths

3. 全炉心解析と単位セルモデルの妥当性の検討 — HCLWR-J1 炉心の解析 —

標準的な稠密高転換炉心HCLWR-J1炉心⁹⁾を取りあげてCOBRA-HCLWRコードを用いて炉心熱流力特性解析を行う。ここでは、主に、本コードの横方向流れ計算のための入力パラメータの計算結果に及ぼす影響を評価するとともに、横方向流れの熱流力特性に及ぼす影響を評価し、パラメータサーベイ計算に用いた単位セルモデルの妥当性を検討する。なお、COBRA-HCLWRコードは、広く用いられているサブチャンネル解析コードCOBRA-III¹⁰⁾を基に、以下に示す項目の改良・修正を行い高転換軽水炉系に対しても適用可能としたコードである。

- ① 臨界熱流束を与える相関式
- ② 炉心圧損評価
- ③ 水の物性値
- ④ 一次系ポンプ特性

また、本章の計算においては、燃料アセンブリーを一つのサブチャンネルとして取り扱うランプ化サブチャンネルモデルを採用している。本コードの改良・修正点及びランプ化サブチャンネルモデルの詳細、並びに使用法はそれぞれ付録2及び4に示した。

3.1 HCLWR-J1 炉心

HCLWR-J1炉心の主要諸元をTable 3.1と3.2に示す。プラントとしては第二章で記述した標準PWRプラントを考える。以下、簡単に燃料ピン、燃料アセンブリ及び炉心について述べる。

(1) 燃料ピン及び燃料アセンブリ

燃料は $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ でPuの富化度は6.5～9%である。その理論密度は95%であるがペレットのディッシュ等を考えて93%とする。燃料ピン及び燃料アセンブリの仕様をTable 3.2に示す。また、Fig.3.1に燃料アセンブリを示す。

(2) 炉心構成及び出力分布

炉心は301体の燃料アセンブリと反射体により構成される。その有効長は223cmである。炉心の初期構成及び燃料のシャッフリングパターンをFig.3.2と3.3にそれぞれ示す。Fig.3.4には炉心が平衡サイクルに達した後の最も径方向ピーキングの大きくなる平衡サイクル初期の出力分布を示している。なお、軸方向出力分布はピーク値1.55の余弦分布に従うものとする。

(3) その他

プレナム長は100cmとして炉心上部に置く。炉心運転圧力は159kg/cm²、出口温度は325℃とする。バンドル外周の側板による圧力損失は、形状圧損係数に含まれているものと考えて特別には評価しない。制御棒チャンネル等の直接には炉心の冷却に寄与しない流れもバンドル流量に加えている(制御棒チャンネルもバンドル流路面積に加える)。さらに、横方向流れの影響

響が現れ易いようにバイパス流量を12%とした。これは、GAPCON-THERMAL 2-HCによるパラメータサーベイ計算における仮定5%よりかなり大きくなっており、熱流力的には極めて厳しくなっている。

3.2 2バンドルモデルによるサーベイ計算

(1) 評価する諸量と評価方法

横方向流れの計算に影響を与えるパラメータは、一般には、模擬実験から決定されるが、稠密格子系に対しては利用できる実験データはほとんど無い。特に、ランプ化サブチャンネルモデルを採用した場合には、幾つかのパラメータについては必ずしも正確な値を決定できるとはかぎらない。従って、単純な体系を対象として入力パラメータの感度解析を行っておくことは重要である。また横方向流れの影響に関しても、全炉心の径方向ピーキングをパラメータとして熱流力特性の概略を把握しておくことは重要である。以上の観点から、Fig.3.5に示すような二つの燃料集合体バンドルから成る体系を考へて、以下の二通りのパラメータ感度解析を行った。解析には、ランプ化サブチャンネルモデルを採用し、一方をホットチャンネル因子 F_{DH} のホットバンドルとし、他方の出力割合は $2 - F_{DH}$ とした。評価する熱流力特性は次のものである。

- ・DNBR
- ・冷却材温度分布
- ・冷却材流量及び速度分布

水の物性値としては温度・圧力に依存した値を使用した。

① 各種パラメータの効果

Fig.3.5に示す二つの燃料集合体間で、径方向出力ピーキング係数を一定値に固定 ($F_{DH} = 1.5$) し、以下のパラメータを変化させた時の熱流力特性の変化をみる。

i) 横方向流れ抵抗係数 K_{ij}

横方向運動量方程式に現われるパラメータで、隣り合うチャンネル間の流路ギャップの形状抵抗係数と類似のものである。パラメータ範囲としては $0.0 < K_{ij} < 1.0$ である。

ii) 横方向運動量パラメータ S/l

Fig.3.6で定義されるコントロールボリュームの幅 S と長さ l の比である。 l については正確な値を決定することができない。特に、ランプ化サブチャンネルモデルでは、物理的にその定義が困難であり、通常は近似的にチャンネル中心間距離で代表する。ここでは、参考文献16のパラメータサーベイと同様な範囲で設定した(但し、COBRA-HCLWRでは、オプションとして、各隣り合うチャンネル毎に S と l を入力することにより、チャンネル間毎にコード内で自動的に算出することも可能である)。

iii) 乱流運動量パラメータ f_T

このパラメータは、いわゆる乱流プラントル数と類似のパラメータと考えられる。従って $f_T = 0.0$ の場合は乱流による混合はエンタルピーのみに関係し、運動量には関係しない。 $f_T = 1.0$ の場合はエンタルピーと運動量に同程度の大きさで寄与する。

IV) 径方向熱伝導パラメータ G_K

熱伝導による熱量輸送に関するパラメータである。このパラメータも確実な決定法はなく、通常はチャンネル中心間距離の逆数で近似される。

V) 乱流ミキシングの相関式 W'

COBRA-HCLWRには、模擬実験等から提唱されている四種類の相関式が用意されているが、高転換炉のような稠密三角ピッチの体系に対しては、どの相関式が適切であるかは明確でなく今後の実験に依るところが大きい。従って、ここでは最も単純な $W' = \beta \cdot S_K \cdot G$ を用いる。 β は通常0.01~0.02程度であるが、ランプ化サブチャンネルモデルでは0.1程度の大きい値を用いることもある。

以上から、パラメータの範囲を以下のように設定した。

$$\begin{aligned} K_{ij} &: 0.25 \quad \underline{0.5} \quad , \quad 1.0 \\ S/l &: 0.25 \quad \underline{0.5} \quad , \quad 1.0 \\ f_T &: 0.0 \quad \underline{0.8} \\ G_K &: 0.0 \quad \underline{0.5} \\ \beta &: 0.01, \quad \underline{0.02}, \quad 0.1 \end{aligned}$$

下線の付いた値は評準値としたものである。

② 出力ピーキング係数の影響

2バンドルモデルで径方向ピーキング係数を1.0から1.5まで変えることにより、横方向流れを考慮した時の熱流力特性のピーキング依存性を評価した。

この場合、各種パラメータは以下の値とした。

$$\begin{aligned} K_{ij} & 0.5 \\ S/l & 0.08 \text{ (但し、コード内で自動設定された値)} \\ f_T & 0.0 \\ G_K & 0.0 \\ \beta & 0.02 \end{aligned}$$

(2) 結果と考察

① 各種パラメータの効果

Table 3.3 に結果を示す。表中、基準とは上記(1)の①で下線を施したパラメータの組み合わせを示しており、他のケースについては変化させたパラメータのみ示している。横方向流れ抵抗係数 K_{ij} 、乱流運動量パラメータ f_T 及び径方向熱伝導パラメータ G_K は熱流力特性にほとんど影響を与えない。横方向運動量パラメータ S/l を0.5を基準にして1.0と0.25に変えた場合、熱流力特性はほとんど変わらないが、 $S/l = 1.0$ では炉心中央部での横方向流れが8%増加する。

乱流ミキシングパラメータ β の変化の結果、熱流力特性に幾分変化がみられる。 β を小さくした場合には、チャンネル間の乱流混合が抑制される結果、ホットバンドルの流量が減少し、出口エンタルピーが増大する。最小DNBRは、 KfK 相関式を用いた場合は低下し、

EPR I 相関式では上昇する傾向がみられる。 β を大きくした場合は、チャンネル間の混合が促進される結果熱流力特性はバンドル間で平均化する。最小DNBRは、KfKで上昇しEPR Iでは低下する。 β を0.02から0.1にした場合のチャンネル温度分布と横方向流れ分布を、それぞれ Fig. 3.7と3.8に示す。

乱流ミキシング相関式については、熱流力特性に与える影響が大きいと考えられるので精度の高い情報が望まれる。しかし、これは実験に依るところが大きいので、今後この点に重点を置いた実験が必要であろう。

② 出力ピーキング係数の影響

Table 3.4 に結果を示す。本表中、最小DNBRの欄の比率とは、ピーキング係数1.0の場合の値に対する比である。ピーキングを増大させた場合には表面熱流束も同じ比率で増加するので、もし他の熱流力値が変化しないならば、この比率はピーキング係数に等しくなるはずである。しかしながら、横方向流れ等の結果として、この比率は高目(MDNBRで低目)の値となっている。出力ピーキングと最小DNBRとの関係を Fig. 3.9 に示す。本計算は過負荷100%となっているので112%時の目安として、 1.3×1.12 を112%限界として図中に示した。本計算ではバイパス流量を12%と多めに取っているので熱流力的にはかなり厳しくなっている。

温度分布をみると、出力ピーキングが1.5(他方のバンドルは0.5)の場合、Fig. 3.7から分かるように二つのバンドル間では約35°Cの出口温度差が生じている。

Fig. 3.10 にホットバンドルでの流量減少割合を示す。出力ピーキング係数(ホットチャンネル因子)が1.6以下では減少割合は5%未満となっている。なお一次系流量は各ケースで約 56.62×10^6 kg/hr, 炉心平均質量流束は 15.48×10^6 kg/m²hで、その変化は0.1%以下である。この結果から、GAPCON-THERMAL2-HCによる単位セルモデルパラメータサーベイにおいてホットチャンネル流量を5%減とした仮定が直ちに正しいとは言えない(バンドル内流量配分の評価がなされていない)が、ある程度の妥当性を有していると考えられる。

③ バイパス流量の影響

バイパス流量を5%とした場合の結果を Table 3.5 に示す。この場合には、一次系流量は約 57.79×10^6 kg/hと少し減少するが、炉心平均質量流束は 16.33×10^6 kg/m²hと増加する。その結果、最小DNBRは約5%大きくなる。また、ホットバンドル流量の減少割合は $F_{JH} = 1.5$ で約0.3%小さくなっている。

④ 単位セルモデルとの比較

ピーキング係数(ホットチャンネル因子)が1.5の場合に対して、単位セルモデルに基づく計算をCOBRA-HCLWRとGAPCON-THERMAL2-HCコードを用いて行い、2バンドルモデルの結果と比較した。後者コードによる計算は、バイパス流量が12%であることとスパイラルリブの幅が0.553 mmであることを除いて、二章で述べたパラメータサーベイと同じ方法で行った。結果を Table 3.6 に示す。COBRA-HCLWRの結果についてみると、単位セルモデルで水の物性値として飽和蒸気表の値を使用した場合に少し厳し目の値を与えているが、二つのモデルの結果はほぼ一致している。出口エンタルピーが大きく異な

っている理由は、2バンドルモデルでは横方向流れのためにプレナム部で熱混合があることと、バンドル内流路に制御棒周りの流路を含んでいるため熱出力当りの流量が大きいことによっている。COBRA-HCLWRの単位セルモデルでは全流路面積には制御棒周りの流路を含んでいるので、質量流束は両モデルでほとんど変わらず、その結果、他の熱流束値はよく一致している。

一方、GAPCON-THERMAL2-HCの計算モデルでは、制御棒周りの流れはバイパス流として取り扱うということで、全流路面積がCOBRA-HCLWRによる計算より7%強小さくなっている。その結果、チャンネル流量が大きくなり、最小限界熱流束値は約4%大きくなっている。この結果は、5%のバイパス流を仮定したCOBRA-HCLWRの結果（Table 3.5）とほぼ一致している。これは、COBRA-HCLWRの計算モデルでは7%強の制御棒チャンネルを流れる流水は、実質的にバイパス流となっていることによる。

本研究で行ったGAPCON-THERMAL2-HCコードによるパラメータサーベイでは、バイパス流5%を仮定しているので、制御棒チャンネル流量が5%を明らかに越える炉心に対しては本パラメータサーベイの結果に制御棒チャンネルを流れる流量に見合うバイパスをかける必要がある。

3.3 全炉心サブチャンネル解析

炉心の対称性を考慮してFig. 3.11に示した1/12炉心を解析の対象とし、各燃料集合体を1チャンネル1燃料棒でランプ化したモデルで解析した。図中には各チャンネル番号及びギャップ番号を示した。全バンドル数は33、全ギャップ数は72である。各バンドルの出力分布はFig. 3.7に示した。本解析では、計算時間を考慮して、水の物性値としては飽和水の値を基準として用いた。圧力・温度の関数を使用した場合には、約4倍の計算時間を必要とするケースもあった。

まず、2バンドルモデルで行ったのと同様のCOBRA-HCLWRの入力パラメータの感度解析の結果を、Table 3.7に示す。基準としたパラメータは2バンドルモデルの場合と同じである。パラメータを変更した場合の影響は、2バンドルの場合とほぼ同様で、乱流ミキシングパラメータ β の影響がみられる。なお、本表最右欄は S/l をコード内で各バンドル毎に S と l から計算した値を用いて計算した結果を示している。この計算では、上記計算の結果から入口温度 287.1°C 、炉心入力平均質量流束 $15.27 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{h}$ の入口条件を設定し、ポンプ特性による流量計算は行っていない。ホットバンドルにおける結果はほとんど変わっていない。以下に示す結果は本計算による値である。

Fig. 3.12は各チャンネルのピーキング係数と最小DNBRの関係を、全炉心モデル（33バンドル）、2バンドルモデル及び単位セルモデルで比較したものである（単位セルモデルでは、ホットチャンネル流量は平均流量の5%減であると仮定しているため、この関係は直線で表わされている）。単位セルモデル及び全炉心計算の結果が少し低い値を与えている。しかし、この不一致は、Table 3.7からわかるように使用した水の物性値の違いによって生じている。水の物性値の違いによって最小DNBRで約1.6%の差が生じている。この結果から、全炉心の熱流束特性は2バンドルモデルでほぼ予測できることが分かる。単位セルの結果は $F_{DH} = 1.5$ で若干低い

他のピーキング係数に対しては明らかに安全側の評価を与えている。

各バンドルのピーキング係数と流量減少割合の関係を Fig. 3.13 に示す。全炉心計算 (33バンドル) の結果は、各バンドルの配置の効果については考えていないが、ほぼ2バンドルの結果と一致しており、ホットバンドルの減少割合は5%未満となっている。但し、バンドル内での流量分布解析を行っていないので、この結果のみで単位セルモデルにおける流量5%減の仮定が妥当であるとは結論できない。バンドル内の流量分布に関しては、高速炉におけるラッパー管削除型集合体の計算例を参考にすると1~3%程度とみられる。本解析で、ホットバンドル流量減少割合は3%弱となっているので、バンドル内流量分布を考慮しても5%減の仮定は有力であると考えられる。

Fig. 3.14 は過負荷 112%時の最小DNBRとピーキング係数の関係を示している。100%時と比較すると、EPRI 相関式を使用した結果は、全ピーキング係数に対してはほぼ1/1.12倍した値になっている。一方、KfK相関式では、ピーキング係数が1.35より大きくなると急激に小さくなっている。これらのバンドルでは、炉心入口からの高さが約200cmの所で飽和沸騰が起っており、これより高い位置での流量減少割合が10%近くになっている。KfK相関式では200数cmの所、EPRI相関式では約150cmの所で最小DNBRが生じていることから、上記の結果となっている。したがって、飽和沸騰が生じた場合には、5%の流量減の仮定はまったく成立せず、最小DNBRに関しては注意を必要とする。

なお、本節で行った解析では、制御棒チャンネル等の燃料を直接には冷却しない流れ (7%強) の他に、バイパス流12%を取っているので、熱流力的には極めて厳しい評価となっていることを付記しておく。

3.4 評価結果

COBRA-III C を基に、高転換軽水炉にも適用できる COBRA-HCLWR を開発し、稠密な HCLWR-J1 炉心を対象として炉心熱流力特性解析を行った結果、から以下のことが結論される。

(1) 横方向流れ等を表わす各種パラメータの感度

横方向流れ抵抗係数 K_{ij} , 横方向運動量パラメータ S/l , 乱流運動量パラメータ f_T , 径方向熱伝導パラメータ G_K については、熱流力値に大きな影響を及ぼさないパラメータであることが明らかになった。

乱流ミキシング相関式については、熱流力特性に与える影響が幾分大きいので精度の高い情報が望まれる。しかしながら、これは実験に依るところが大きいので、今後この点に重点を置いた実験が必要であろう。

(2) ホットバンドル流量減少割合

ホットバンドル流量減少割合は、出力ピーキングが1.6以下では約3%以下であり、単位セルモデルで仮定した5%よりかなり小さくなっている。なお、両者で一次系全流量は良く一致している。本解析ではバンドル内流量分布の解析は行っていないが2%程度の余裕があることから、単位セルモデルにおける5%減の仮定はほぼ妥当であると言える。ピーキング係数と流量減少割合の関係は2バンドルモデルと全炉心モデルでほぼ一致しており、バンドルの配置の

影響はほとんど現われていない。なお、ホットバンドルで飽和沸騰が生じた場合にはこの限りでないので注意を要する。

(3) 最小DNBR

流量減少割合と同様に、2バンドルモデルと全炉心の結果はよく一致した。単位セルモデルは若干安全側の評価となっている。

(4) その他

本章で得られたHCLWR-J1炉心の熱流力特性は、制御棒チャンネル流量(7%強)の他に12%のバイパス流を仮定しているため極めて厳しい評価となっている(バイパス流を7%減ずることにより約5%最小DNBRが高くなる)。GAPCON-THERMAL2-HCコードによるパラメータサーベイでは制御棒チャンネルの流れに関しては特に考慮せず、バイパス流に含まれるものと仮定しているため、制御棒チャンネルの多い炉心に対しては、本パラメータサーベイの結果に対してバイパス流をかける必要がある。

Table 3.1 Specification of HCLWR-J1

	HCLWR-J1	KfK (homogeneous)
Core thermal output	3411 MWt	3730 MWt
Equivalent core diameter	375 cm	386 cm
Active core length	223 cm	220.6 cm
Number of fuel assemblies	301 (97+102+102)	301
Average linear heat rate	169 W/cm	180 W/cm
Inventory		
Heavy metal	103.2 t	111.0 t
Fissile Pu	7.9 t	8.0 t
Fissile Pu enrichment	9.0 weight %	8.25 weight %
Operating condition		
System pressure	159 kg/cm ²	
Outlet temperature	325 °C	

Table 3.2 Specification of fuel pin and assembly (HCLWR-J1)

Pin Pitch	1.11 cm
Fuel Rod OD	0.95 cm
Pellet OD	0.851 cm
Fuel Material	PuO ₂ -UO ₂
Cladding Thickness	0.04 cm
Cladding and Rib Material	SS 304
Rib Height	0.08 cm
Rib Width	0.053 cm
Tie Rod OD	1.11 cm
Guide Tube OD	1.11 cm
Guide Tube and Tie Rod Material	SS 304
Fuel Pins per Assembly	300
C.R. Guide Tubes per Assembly	24
Tie Rods per Assembly	6
Detector Guide Tubes per Assembly	1
Assembly band Thickness	0.08 cm
Interassembly Water Gap	0.1 cm
Assembly Pitch	20.6 cm
Active Core Height	223 cm
Fissile Pu Enrichment (charged fuel in equilibrium cycle)	9.0 w/o

Table 3.3 Effect of input parameters in COBRA-HCLWR calculation
(two bundle model)

Thermohydraulic properties	Parameter								
	Standard	Kij	s/1	Kij	s/1	f _r	Gk	β	β
MDNBR	1.0	0.25	1.0	0.25	0.25	0.0	0.0	0.01	0.1
KfK	1.3337	1.3339	1.3340	1.3343	1.3342	1.3342	1.3339	1.3329	1.3416
EPRI	1.1512	1.1513	1.1514	1.1516	1.1514	1.1514	1.1513	1.1564	1.1165
Flow rate in hot bundle (kg/s)	44.772	44.773	44.777	44.786	44.779	44.791	44.773	44.670	45.409
Inlet temperature (°C)	286.88	286.88	286.88	286.89	286.88	286.88	286.88	286.88	286.89
Outlet enthalpy	1624.6	1624.6	1624.6	1624.4	1624.5	1624.5	1624.6	1632.1	1579.6
Bundle 1 (kJ/kg)	1406.3	1406.4	1406.4	1406.8	1406.4	1406.4	1406.4	1400.0	1446.6
Bundle 2 (kJ/kg)									
Pressure drop									
Total (kg/cm ²)	7.2123	7.2123	7.2107	7.2113	7.2130	7.2123	7.2123	7.2144	7.2089
Cross flow* (kg/s.m)	1.3899	1.4275	1.4248	1.4990	1.4156	1.4154	1.4256	1.4546	1.2827
Average velocity (m/s)	6.044	6.044	6.029	6.037	6.040	6.032	6.044	6.032	6.033

* At the axial midpoint of the core.

Table 3.4 Effect of radial peaking (two bundle model)

Thermohydraulic properties	Radial peaking factor					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
MDNBR						
KfK	2.0633	1.8646	1.6989	1.5589	1.4388	1.3343
(ratio*)	(1.0)	(1.107)	(1.215)	(1.324)	(1.434)	(1.546)
EPRI	1.7592	1.5923	1.4539	1.3373	1.2376	1.1514
(ratio*)	(1.0)	(1.105)	(1.210)	(1.316)	(1.422)	(1.528)
Inlet temperature (°C)	286.92	286.90	286.90	286.90	286.89	286.88
Outlet enthalpy						
Hot bundle(kJ/kg)	1511.6	1534.0	1556.5	1579.0	1601.7	1624.3
Pressure drop						
Total (kg/cm ²)	7.2000	7.2039	7.2053	7.2058	7.2081	7.2116
Flow rate in						
hot bundle (kg/s)	46.358	46.037	45.735	45.439	45.137	44.817
Cross flow**						
(kg/s.m)	0.0	0.2742	0.5360	0.7923	1.0607	1.3120
Average velocity						
(m/s)	6.043	6.043	6.037	6.042	6.029	6.026
Mass flux						
Hot bundle(Gg/m ² h)	15.480	15.373	15.272	15.173	15.073	14.996
Average (Gg/m ² h)	15.480					

Kij=0.5, s/l=0.08, f_r=0.0, Gk=0.0, β=0.02, STEAM.

* Relative values to the case with radial peaking factor = 1.

** At the axial midpoint of the core.

Table 3.5 Effect of radial peaking
(two bundle model, 5 % bypass flow)

Thermohydraulic properties	Radial peaking factor					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
MDNBR						
KfK	2.1601			1.6357		1.4011
(ratio*)	(1.0)			(1.321)		(1.542)
EPRI	1.8220			1.3862		1.1936
(ratio*)	(1.0)			(1.314)		(1.527)
Inlet temperature (°C)	286.28			286.28		286.25
Outlet enthalpy						
Hot bundle(kJ/kg)	1495.6			1559.3		1601.9
Pressure drop						
Total (kg/cm ²)	7.400			7.402		7.410
Flow rate in						
hot bundle (kg/s)	48.905			47.962		47.414
Cross flow**						
(kg/s.m)	0.0			0.8741		1.3668
Average velocity						
(m/s)	6.366			6.363		6.366
Mass flux						
Hot bundle(Gg/m ² h)	16.331			16.015		15.833
Average (Gg/m ² h)	16.331			16.329		16.320

Kij=0.5, s/l=0.08, f_r=0.0, Gk=0.0, β=0.02, STEAM.

* Relative values to the case with radial peaking factor = 1.

** At the axial midpoint of the core.

Table 3.6 Comparison between two bundle and unit cell models

Thermohydraulic properties	two-bundle COBRA	unit cell COBRA	unit cell GAPCON
MDNBR			
KfK	1.3343	1.3096 (1.3328)	1.388
EPRI	1.1514	1.1245 (1.1457)	1.193
Hot bundle			
flow rate(kg/s)	44.817	0.134 (0.136)	0.144
mass flux(Gg/m ² h)	14.966	14.434 (14.631)	15.712
Inlet temperature (°C)	286.88	287.11 (286.93)	287.43
Outlet enthalpy (kJ/kg)	1624.3	1695.9 (1683.7)	-----
Core pressure drop (kg/cm ²)	7.2116	7.0780 (7.1980)	6.980
Flow rate(pri. loop) (Gg/h)	56.62	55.85 (56.66)	56.31
Total channel flow area (cm ²)	32453.	32453.	30105.

Peaking factor (hot channel factor) = 1.5.

Values in parenthesis (unit cell model by COBRA-HCLWR) are obtained by using the same water properties as in two-bundle model (temperature, pressure dependent ones).

Table 3.7 Effect of input parameters in COBRA-HCLWR calculation
(1/12 core, 33 bundle model)

Thermohydraulic properties	Parameter					
	Standard (*)	Kij	s/l	f _r	Gk	β s/l bundle-dependent
MDNBR						
KfK	(1.402)	1.3832	1.3831	1.3830	1.3832	1.3875 (1.173**)
EPRI	(1.212)	1.1914	1.1914	1.1914	1.1914	1.1671 (1.061**)
Flow rate in						
Hot bundle (kg/s)	(44.871)	44.435	44.435	44.443	44.435	44.825
Inlet temperature (°C)	(286.9)	287.1	287.1	287.1	287.1	287.1
Outlet enthalpy						
Hot bundle(kJ/kg)	(1614.2)	1624.5	1624.5	1624.6	1624.5	1594.3
Pressure drop						
Total (kg/cm ²)	(7.21)	7.09	7.09	7.09	7.09	7.09
Primary loop						
Flow rate (Gg/h)	(56.61)	55.9	55.9	55.9	55.9	55.9
Average velocity (m/s)	(6.034)	6.083	6.083	6.083	6.083	6.083

* Temperature, pressure dependent water properties were used.

** Over power factor = 1.12.

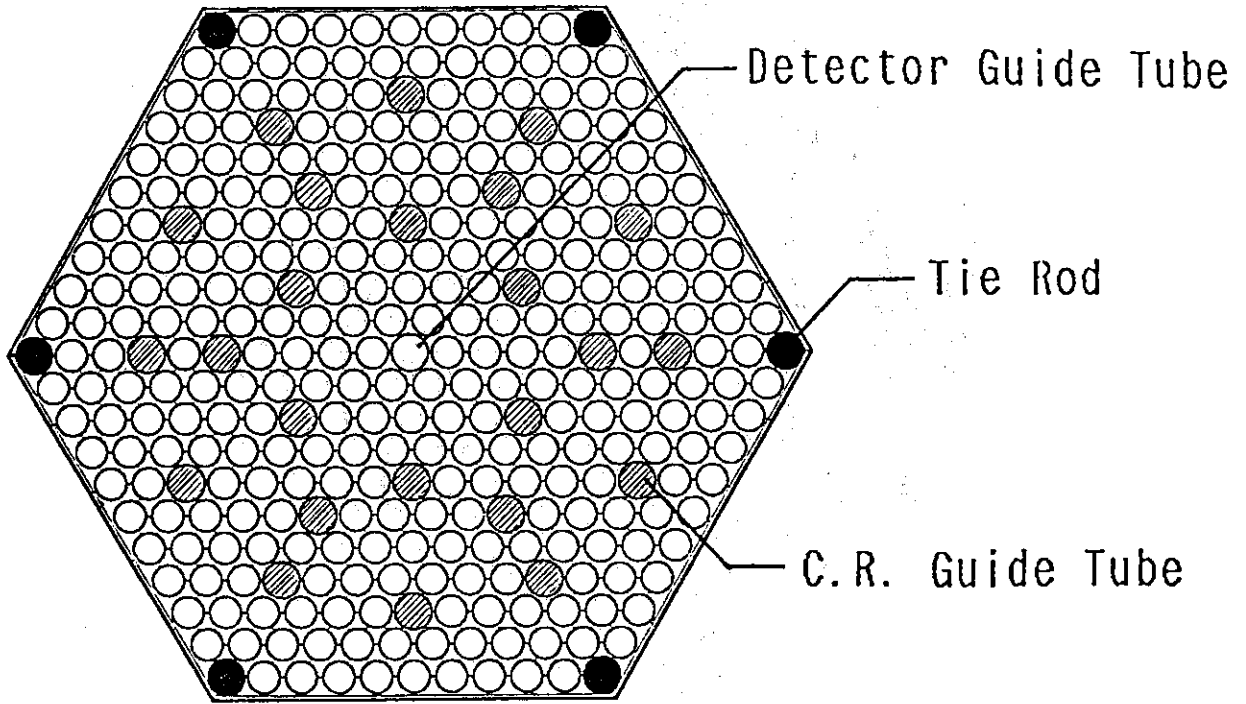


Fig.3.1 Fuel assembly of HCLWR-J1

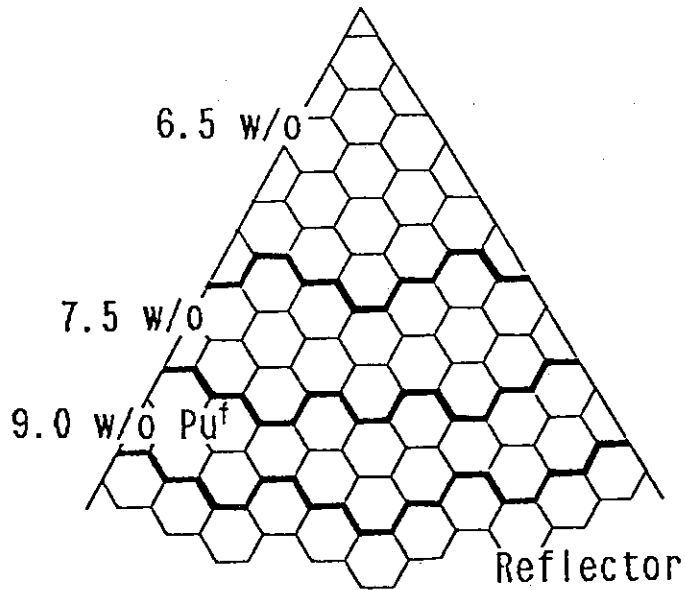


Fig.3.2 1/6 core geometry and initial fissile Pu distribution in HCLWR-J1

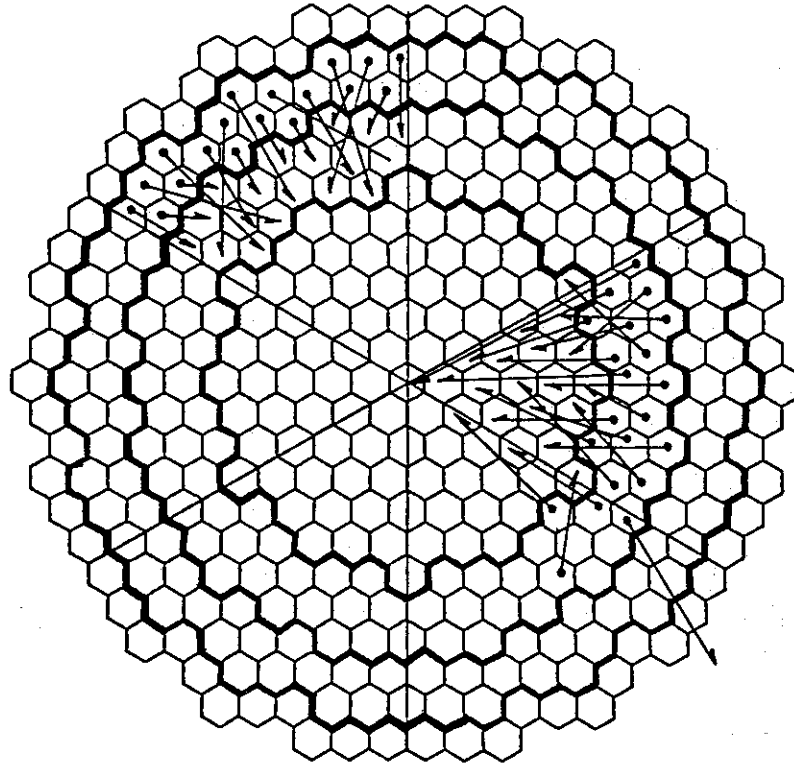


Fig.3.3 Shuffling pattern of HCLWR-J1

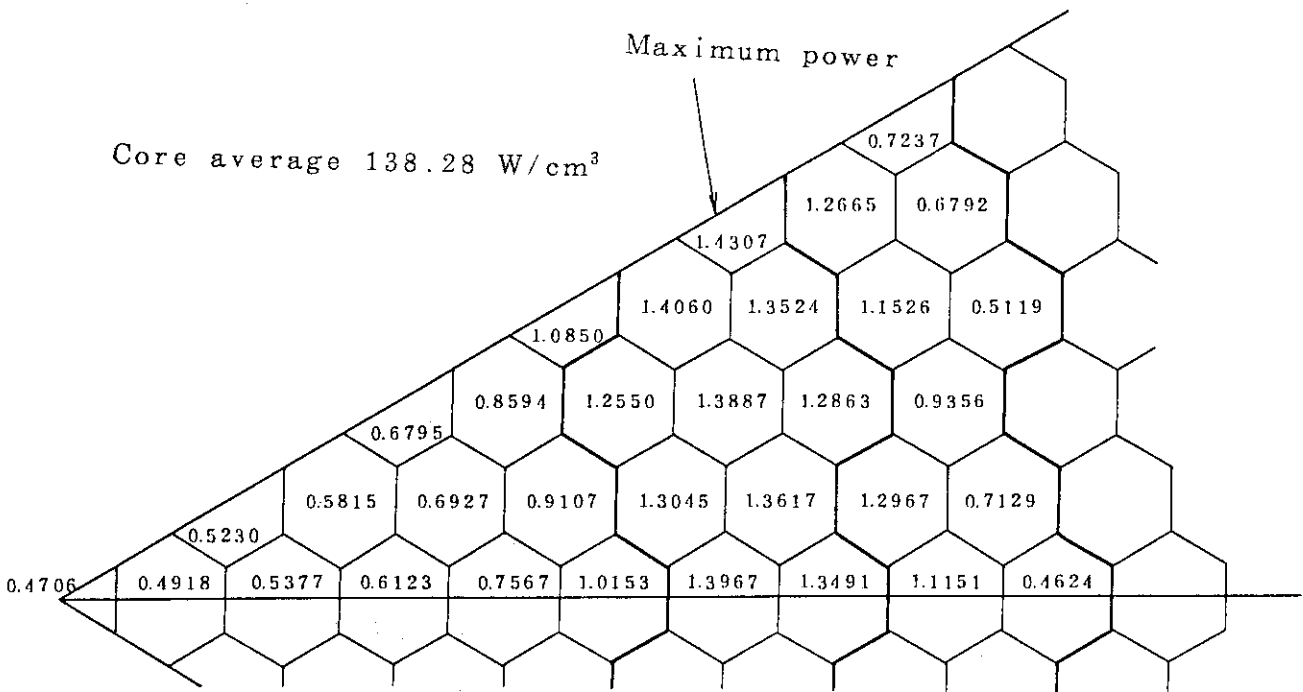


Fig.3.4 Power distribution in HCLWR-J1
 (beginning of the sixth cycle)

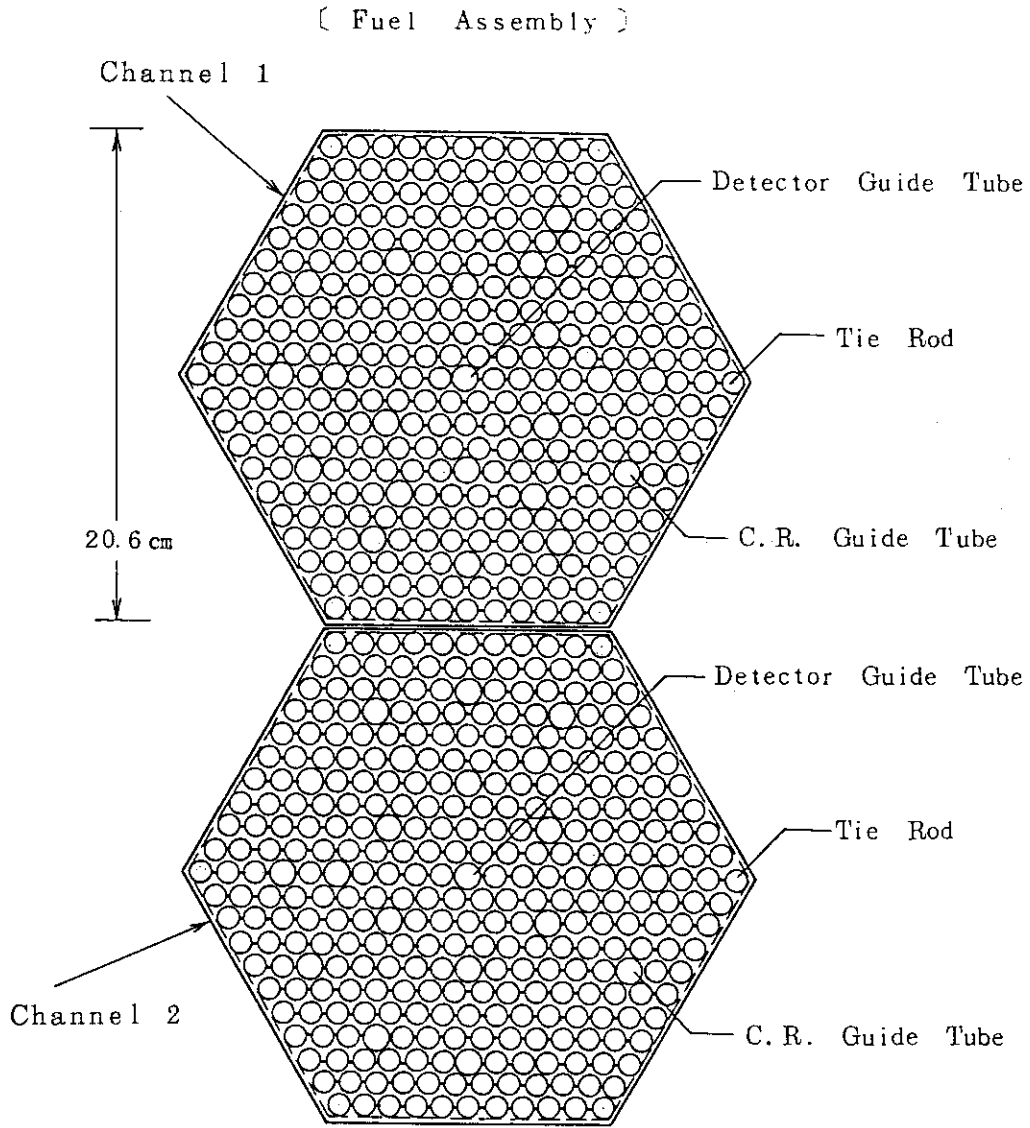


Fig.3.5 Two bundle model

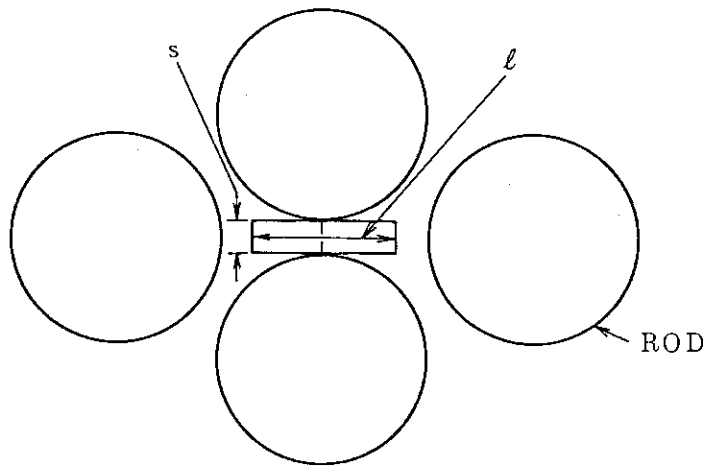


Fig.3.6 Transverse momentum control volume for standard subchannel noding

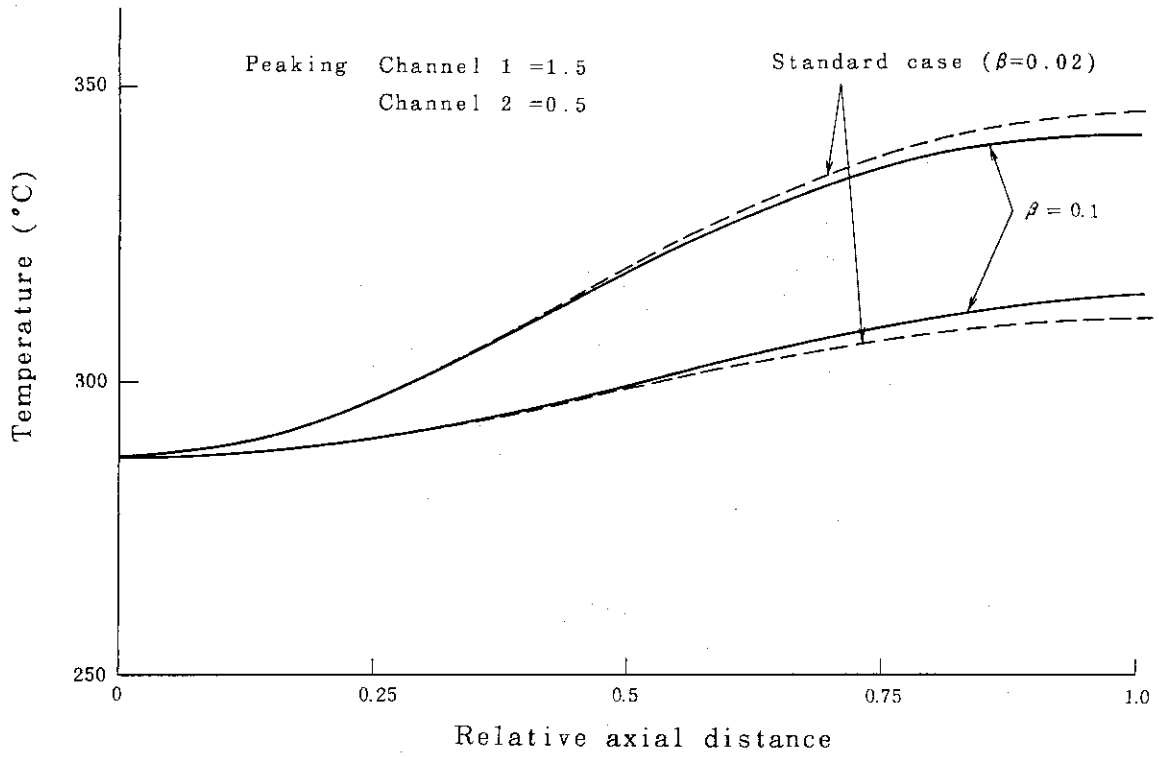


Fig.3.7 Axial distribution of coolant temperature
(β effect in two bundle model)

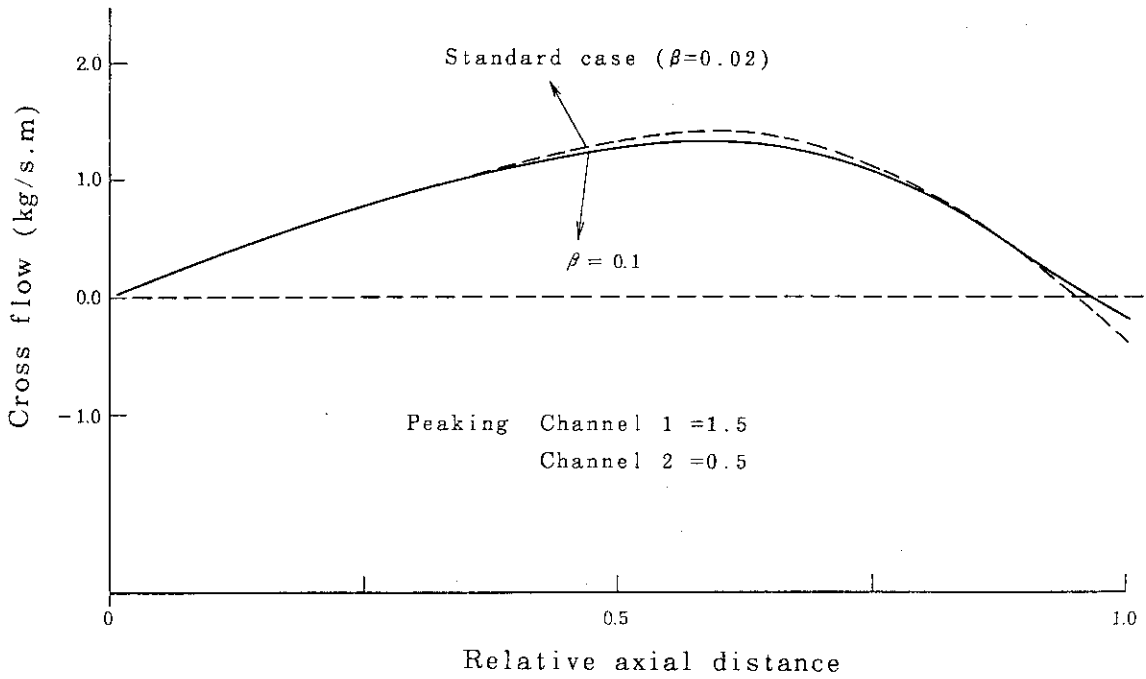


Fig.3.8 Axial distribution of cross flow
(β effect in two bundle model)

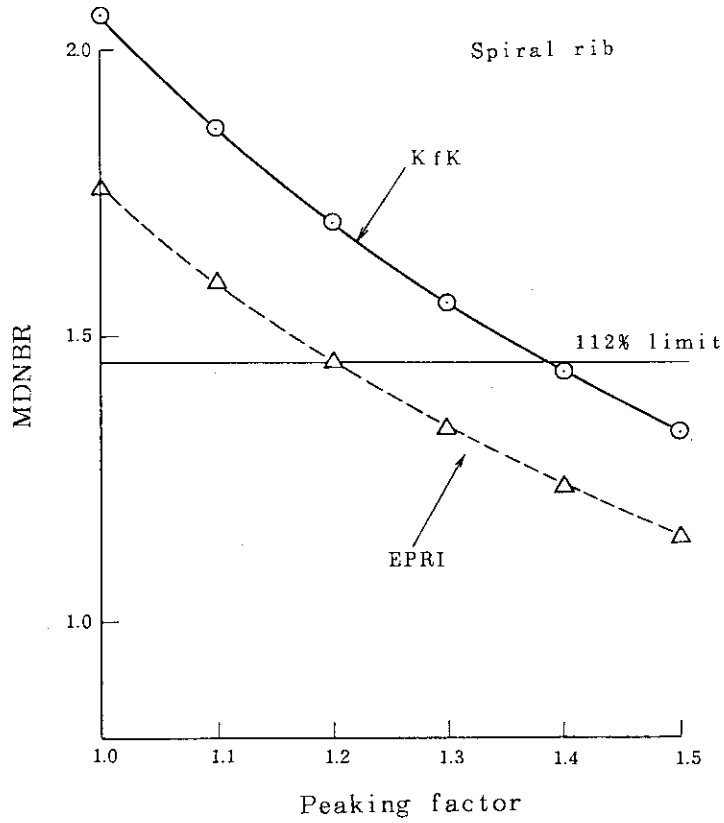


Fig.3.9 MDNBR vs. radial peaking factor (two bundle model)

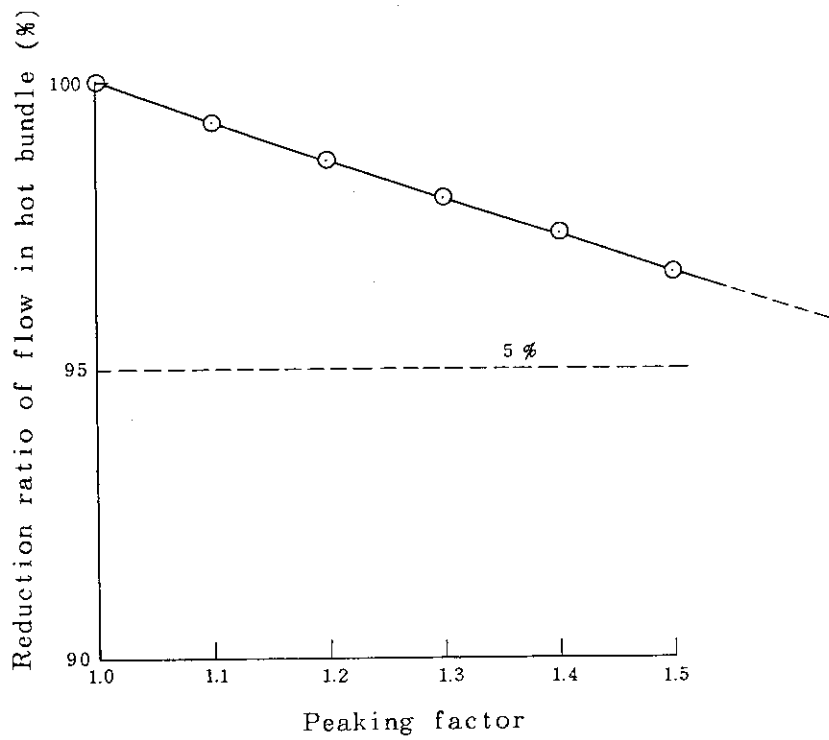


Fig.3.10 Reduction ratio of coolant flow in hot bundle (two bundle model)

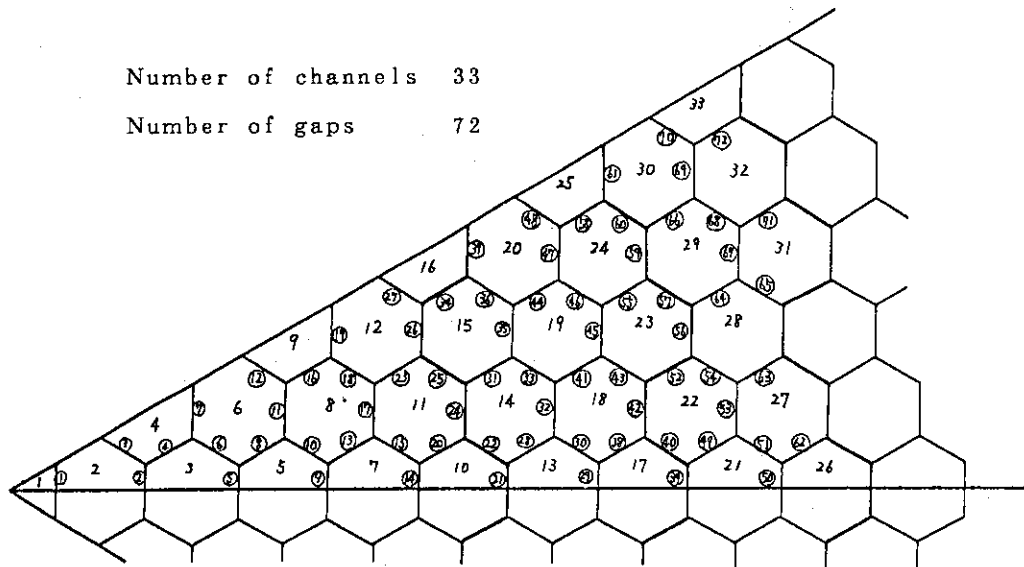


Fig.3.11 COBRA-HCLWR calculation model for HCLWR-J1
 (1/12 core, 33 bundle model)

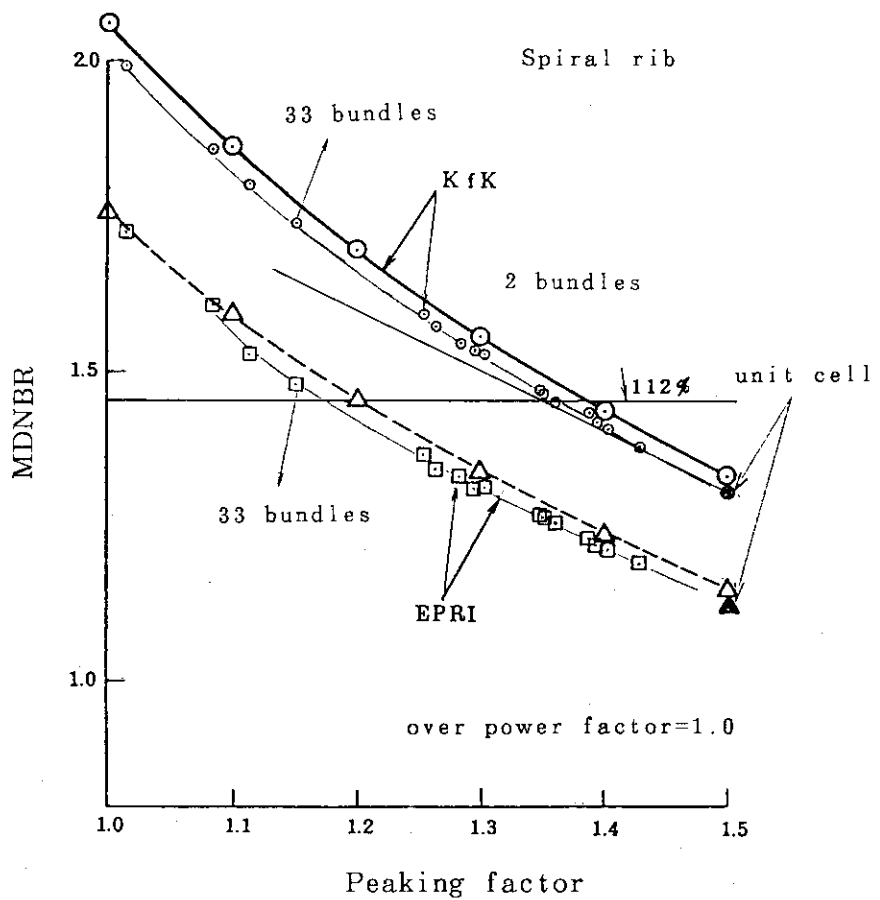


Fig.3.12 MDNBR vs. radial peaking factor (comparison
 between 1/12 core, two bundle and unit cell model)

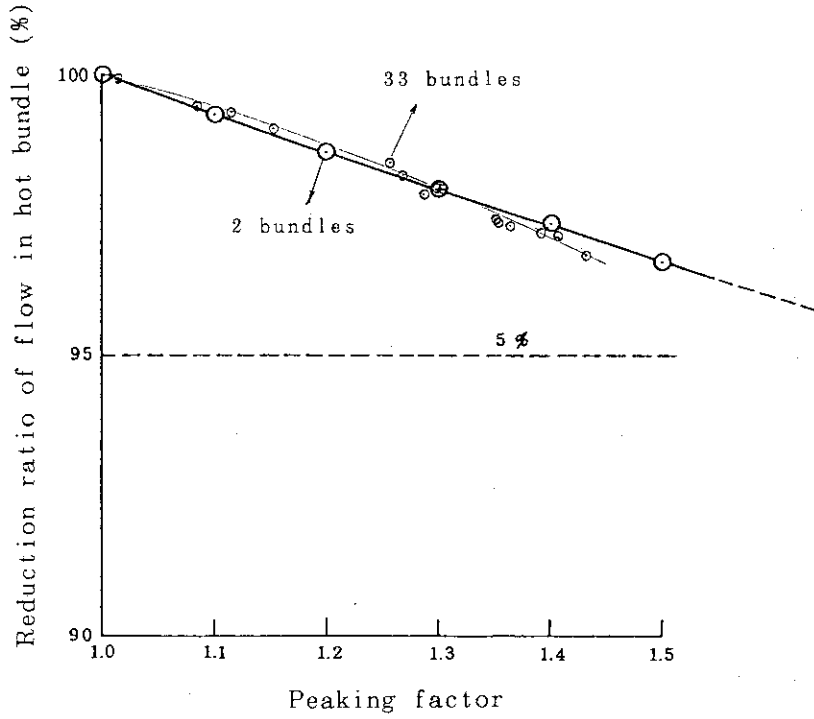


Fig.3.13 Reduction ratio of coolant flow in hot bundle
(comparison between 1/12 core and two bundle models)

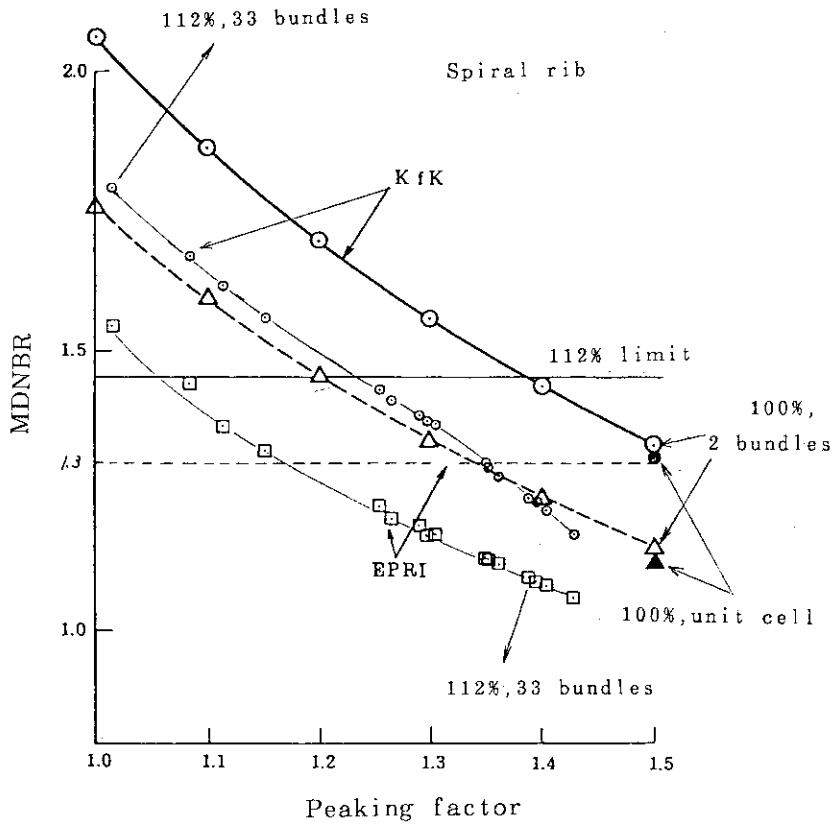


Fig.3.14 MDNBR vs. radial peaking factor
(over power factor = 1.12, 1/12 core model)

4. パラメータサーベイの結果

現用PWRの熱流束設計基準は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化状態において、

- ① 燃料最高温度が融点を越えない。
- ② 遷移沸騰を生じない。

の二点が主なものである。高転換軽水炉にもこれらの基準を適用する。①に関しては、未照射時2550℃、50 GWd/t時2390℃以下とすること、②に関しては、DNBRが1.3以上を確保することで基準を満足することができる。^{A)}但し、運転時の異常な過渡変化状態については特別に考慮するかわりに、過負荷112%時をこれに当てるものとする（現用PWRでは定常運転時の最小DNBR \approx 1.8であることを考慮するとさらにマージンが必要かもしれない）。ここでは、計算結果を上記二点を中心にまとめる。

4.1 スパイラルリブスペーサ型炉心

(1) 燃料温度

Fig.4.1に、燃料最高温度($T_{f\max}$)、燃料ペレット表面温度(T_{f0})及び被覆管表面温度の軸方向分布の例を示す。Fig.4.2には、112%過負荷時の $T_{f\max}$ とホットチャンネル因子(F_{DH})の関係を示す。 $T_{f\max}$ はほとんどの場合燃焼初期に生ずるが、燃料ペレットの熔融温度は燃焼度に依存するので燃料寿命中溶融点以下であるとは限らない。しかしながら、本パラメータサーベイの範囲ではピン径(D)が8.5mm以下の場合のみに融点を越えることがあった。しかも大部分の場合燃焼初期に越えている。本図は、 $T_{f\max}$ の観点からは、最も厳しくなる $D=8.5$ mm、 $q_L=20$ kw/mの結果を示している。この場合でも $F_{DH}=1.59$ 以下では、 $T_{f\max}$ は燃料溶融温度以下となっており、 $T_{f\max}$ に対する条件は、炉心成立性の制限とはならないことが分かる。

(2) DNBR

二つの相関式(KfKとEPRI)によるDNB熱流束の軸方向分布をFig.4.3に示す。炉心入口部ではKfK相関式、出口部ではEPRI相関式が高いDNB熱流束を与えている。Fig.4.4にはDNBRの軸方向分布を示す。最小DNBRは、KfK相関式では炉心出口付近で生ずるのに対し、EPRI相関式では炉心入口からほぼ2/3の位置で生じ、しかもKfK相関式による値よりも低目となっている。

最小DNBRの各パラメータ依存性をFig.4.5～4.18に示す。これらは $F_{DH}=1.5$ 、過負荷112%時の結果である。これらの結果から以下の特性が明らかになった。

A) 原子力安全審査指針集改訂4版(1988年)によれば、PWR炉心熱設計のために新しく作成されたDNB相関式を用いた場合の最小DNBRの許容限界値は1.17となっているが、ここではKfK及びEPRIの設計例にみられる基準に従った。

- i) KfK 相関式の結果は一般に EPRI 相関式の結果より高目の値を与え、20%以上相違する場合もある。両者の結果は炉心が稠密になるに従って近づく。
- ii) ピッチ一定でピン径を増加させた場合、KfK 相関式では最大値が存在するのに対して、EPRI 相関式の結果は単調に増加する傾向がみられる。M. Dalle Donne は、この原因は後者の相関式にはスパイラルリブの効果が考慮されていないためであると指摘している。¹⁴⁾
- iii) ピン径一定でピッチを増加させた場合、KfK 相関式では最大値が存在するが、EPRI 相関式では単調に減少する（あるいは、非常に稠密な所に最大値がある）。
- iv) 線出力を 16 kw/m から 20 kw/m に増加させた場合、KfK、EPRI 両相関式の結果とも他のパラメータにはそれほど依存せず、前者で約 8%（絶対値で 0.09～0.12）、後者で約 12%（絶対値で 0.12～0.14）直線的に減少する。
- v) 炉長を 2 m から 3 m に増加させた場合、KfK 相関式の結果は他のパラメータにそれほど依存せず、約 13%（絶対値で 0.14～0.17）直線的に減少する。一方、EPRI 相関式では直線的に減少はするが、クリアランス（P-D）が小さいほど減少率が大きい。

(3) 流力特性と二次系特性

炉心圧損及び炉心平均流速 (U_m) の変化を Fig. 4.19, 4.20 に示す。ピッチが小さい場合には、ピン径が増加すると炉心圧損及び平均流速は急激に増加するが、ピッチが大きい場合には炉心圧損はピン径にほとんど依存しなくなる。Fig. 4.21 に、一次系流量の変化を示す。Fig. 4.22 には、二次系の制限による取り出し可能炉心熱出力と一次系流量の関係を示す。本図より、95% (3240 MW_t) 出力時に一次系流量が 49.3×10^6 kg/h あればその熱を取り出すことができることが分かる。

4.2 グリッドスペーサ型炉心

(1) 燃料最高温度

燃料最高温度 ($T_{f \max}$) のホットチャンネル因子 (F_{JH}) の依存性は Fig. 4.23 に示したようにスパイラルリブスペーサの場合と同様の傾向を示している。しかし、 $T_{f \max}$ は被覆管にジルカロイを使用することによって、30°C～50°C 低下している。これは SUS 304 とジルカロイ被覆ではペレット・被覆管間のギップコンダクタンスが大きく変わるためである。グリッドスペーサを使用した場合も、 $T_{f \max}$ に対する条件は炉心成立性の制限とはならない。

(2) DNBR

Fig. 4.24, 4.25 に、それぞれ DNB 熱流束と DNBR の軸方向分布を示す。両者ともスパイラルリブスペーサの場合と同様の傾向を示している。なお、本節の図中 OLD で示されているのは、グリッドの圧損係数を文献 3 の方法によって第 2.2.2 (3) 節に示したものよりかなり小さく設定した場合の結果である。

最小 DNBR の各パラメータ依存性を、 $F_{JH} = 1.5$ 、過負荷 112% 時について Fig. 4.26～4.43 に示す。スパイラルリブスペーサ型炉心の場合と比較すると、最小 DNBR は一般に大きくなっているが、各パラメータ依存性は以下の通りである。

- i) KfK相関式とEPR I相関式では20%以上相違する場合もあり、前の相関式が高い値を与える。両相関式の結果は炉心が稠密になると近づく。
 - ii) ピッチ一定でピン径を変化させた場合、両相関式とも最大値を取るピン径が存在する。そのピン径は、EPR I相関式の結果の方が、稠密側に現われる。
 - iii) ピッチ依存性は両相関式とも同様の傾向を示し、稠密になるほど最小DNBRは小さくなる。その依存性はKfK相関式の方が幾分大きい。
 - iv) 線出力を16 kw/mから20 kw/mに増加した場合、両相関式による結果とも、他のパラメータには依存せず、KfK相関式で約7% (絶対値で0.1~0.13)、EPR I相関式で約12% (絶対値で0.14~0.15)直線的に減少する。
 - v) 炉長依存性はスパイラルリブスペーサ型炉心の場合と同様である。KfK相関式では2 mから3.5 mに増加させた場合、約12% (絶対値で0.18~0.2)直線的に減少する。EPR I相関式では直線的に減少するが、その減少率はクリアランス(P-D)に依存し、クリアランスが小さいほど減少率が大きい。
- (3) 流力特性と二次系特性
- 炉心圧損及び炉心平均流速の変化をFig.4.44, 4.45に示す。一次系流量の変化をFig.4.46に示す。

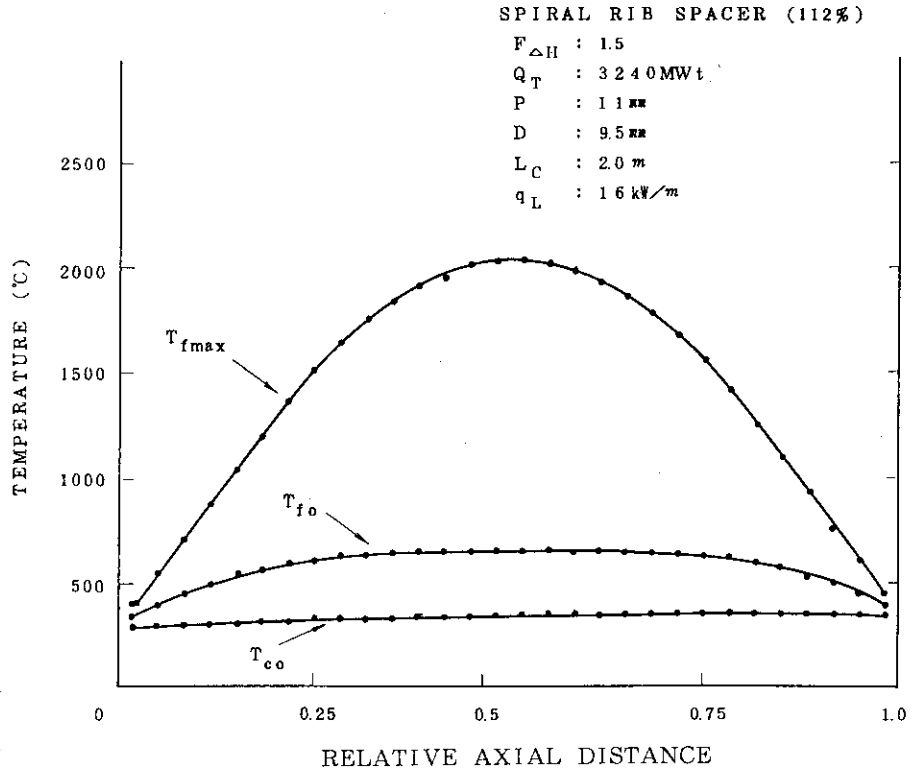


Fig.4.1 Axial distribution of fuel temperature (spiral rib)

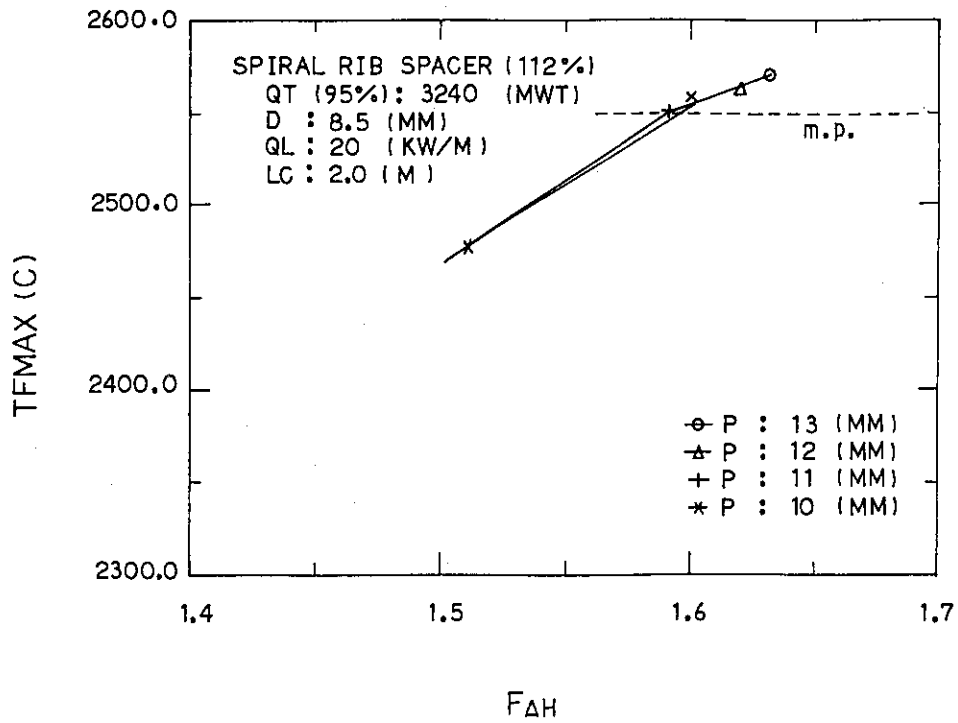


Fig.4.2 Maximum fuel temperature vs. hot channel factor (spiral rib)

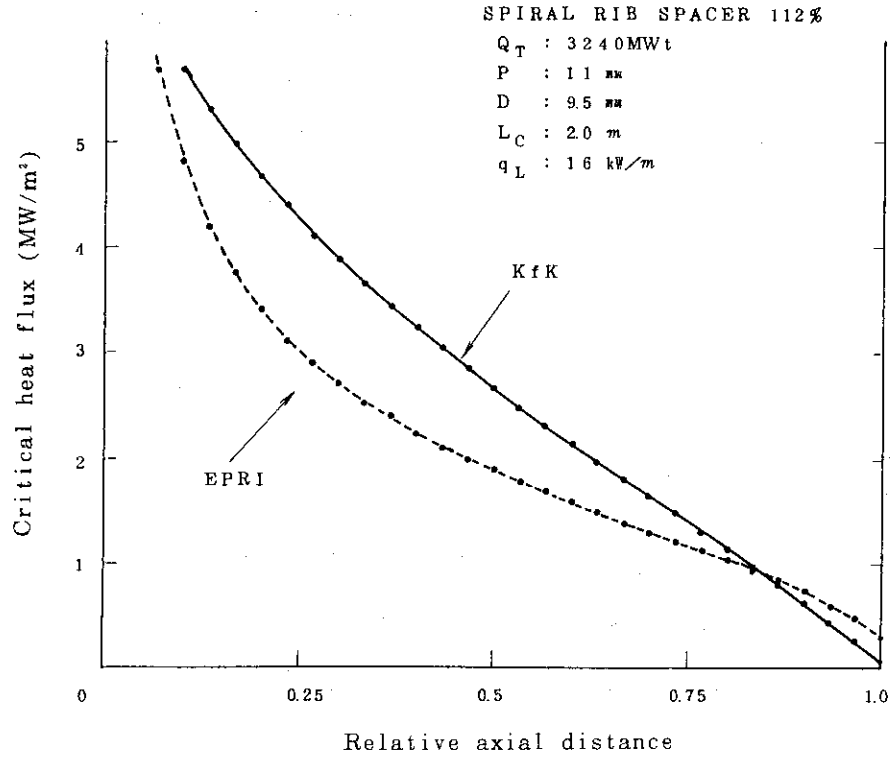


Fig.4.3 Axial distribution of DNB heat flux (spiral rib)

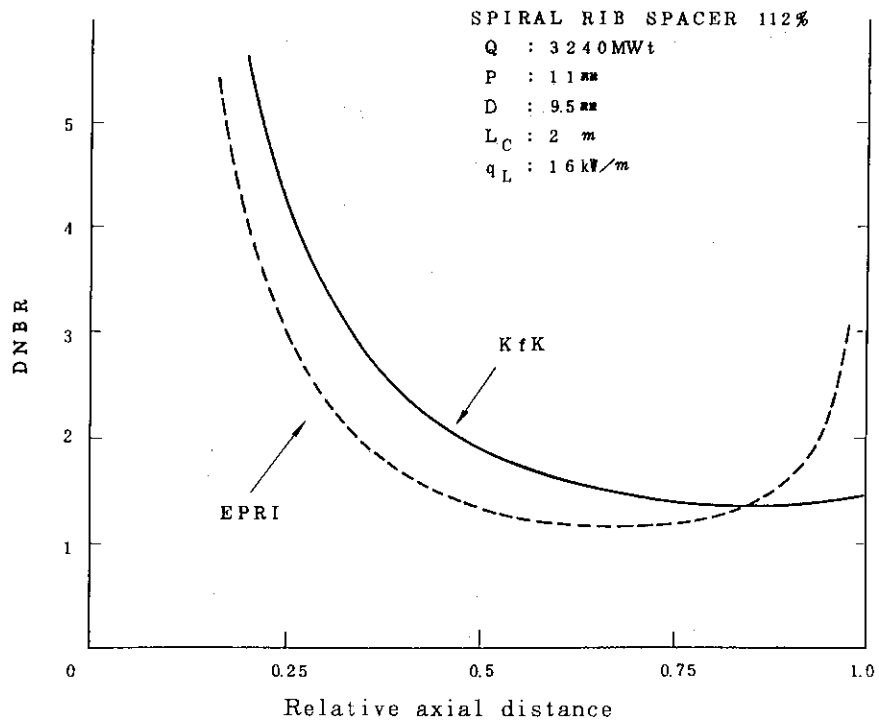


Fig.4.4 Axial distribution of DNBR (spiral rib)

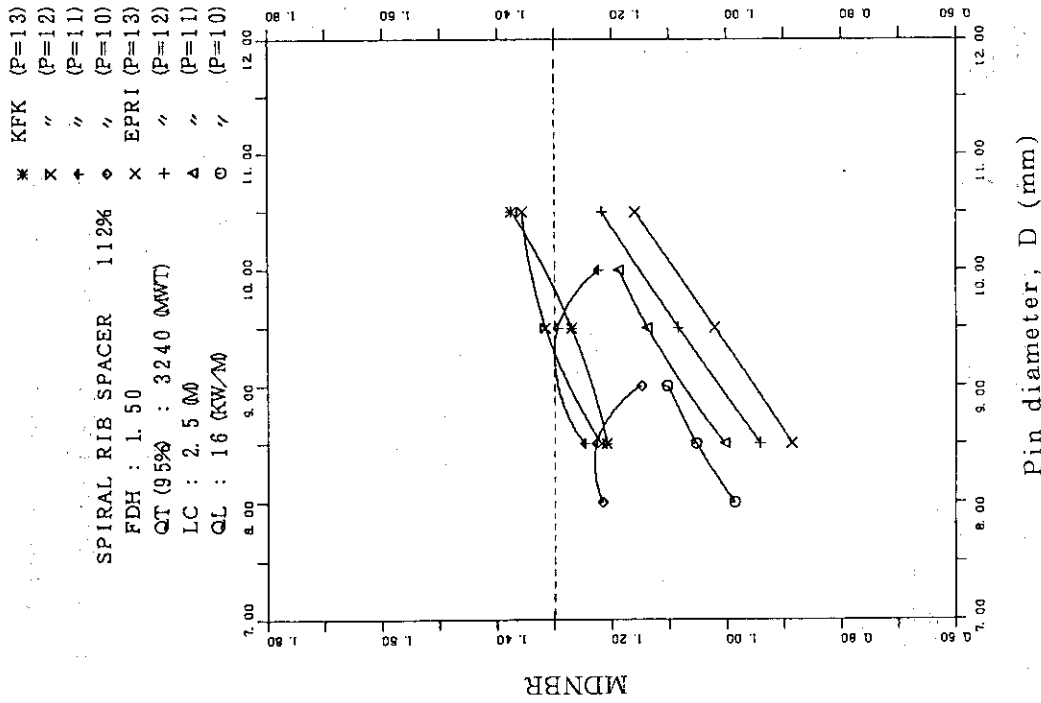


Fig.4.6 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (spiral rib, $F_{4H}=1.5, L_C=2.5m, Q_L=16kW/m$)

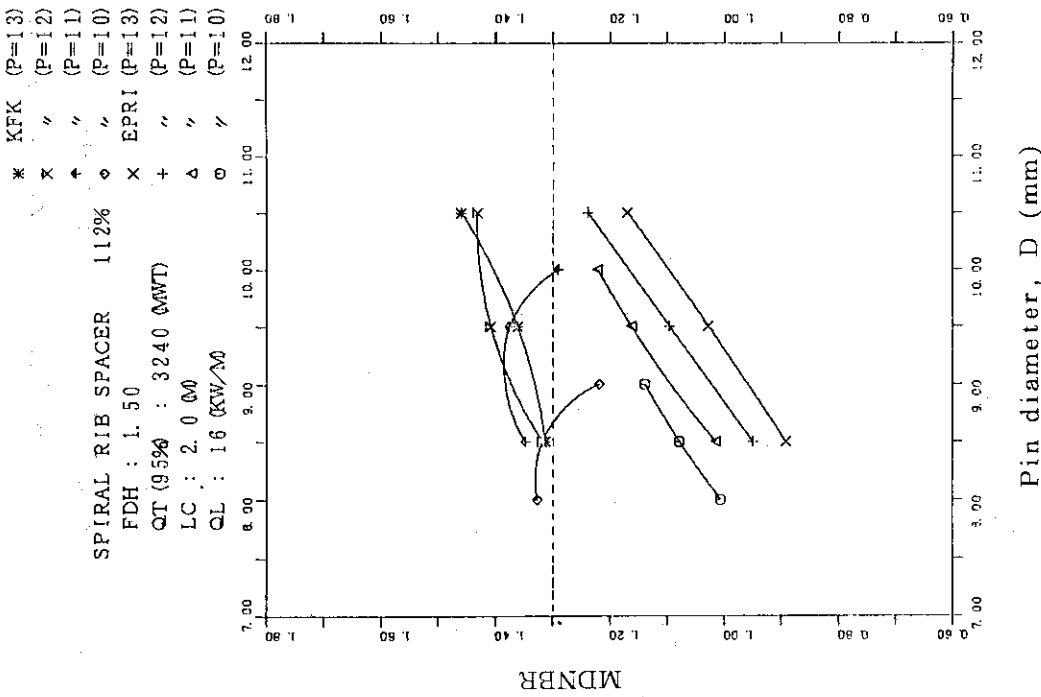


Fig.4.5 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (spiral rib, $F_{4H}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=16kW/m$)

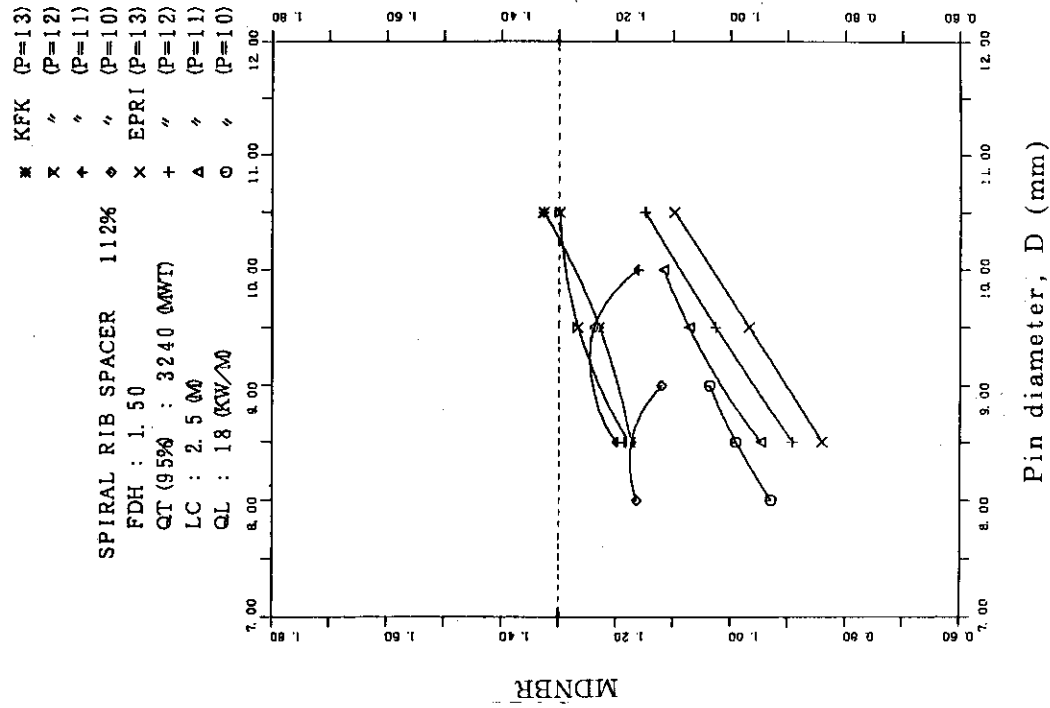


Fig.4.8 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (spiral rib, $F_{RH}=1.5, L_C=2.5m, Q_L=18kW/m$)

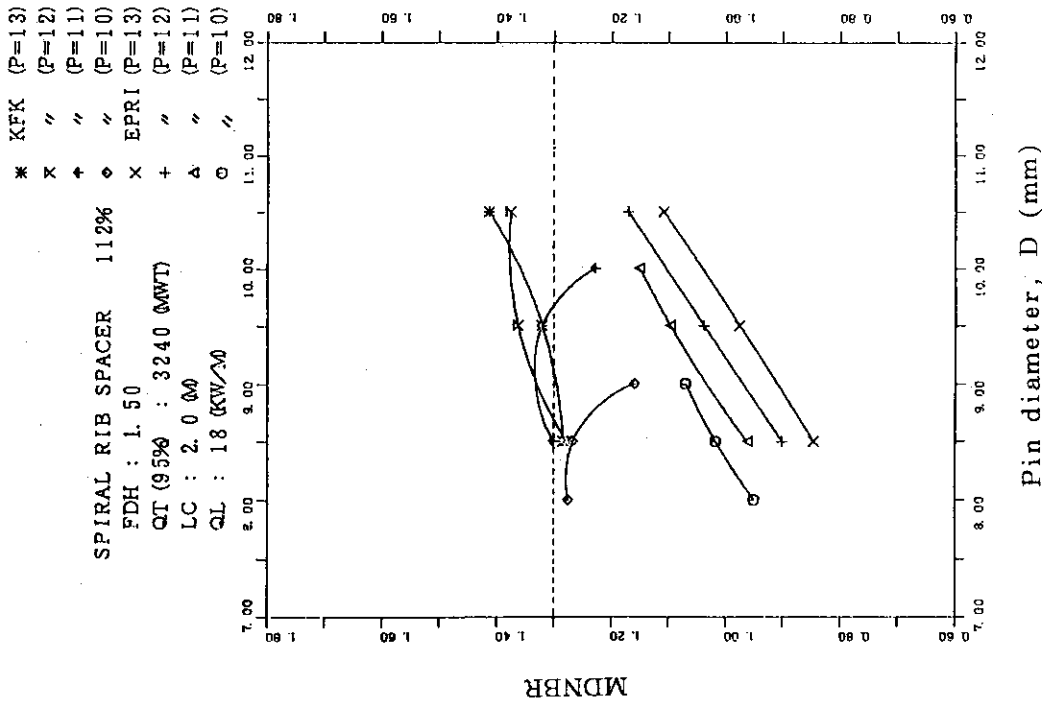


Fig.4.7 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (spiral rib, $F_{RH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=18kW/m$)

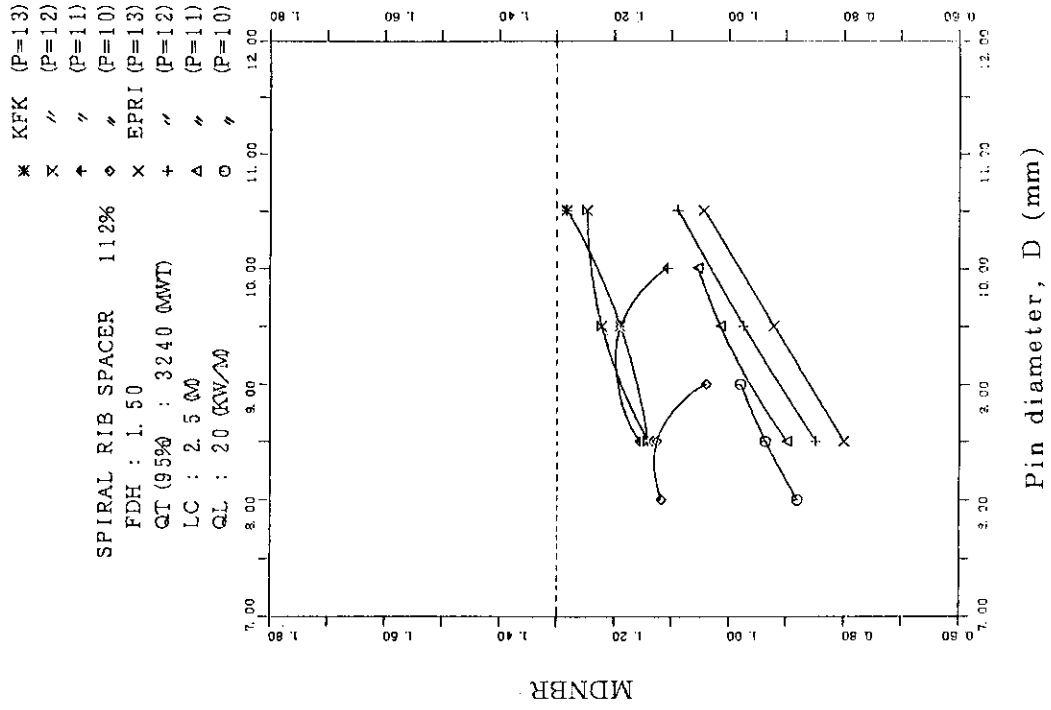


Fig.4.10 Minimum DNBR vs. pin diameter

(spiral rib, $F_{dH}=1.5, L_c=2.5m, Q_L=20kW/m$)

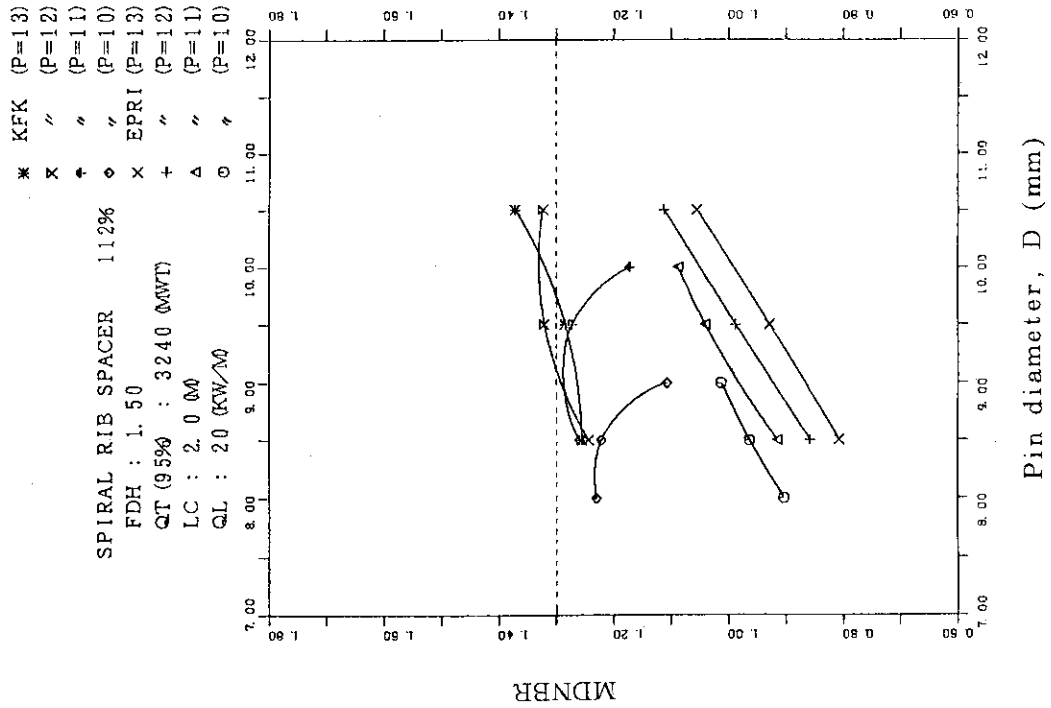


Fig.4.9 Minimum DNBR vs. pin diameter

(spiral rib, $F_{dH}=1.5, L_c=2.0m, Q_L=20kW/m$)

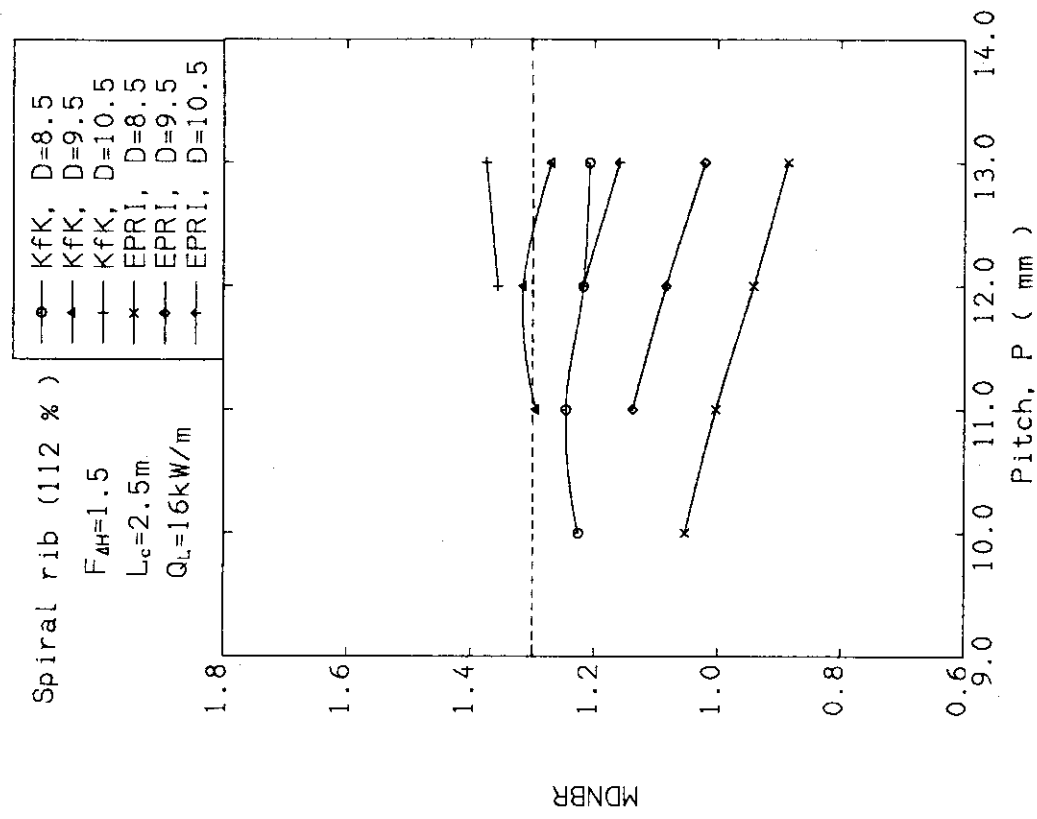


Fig.4.12 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (spiral rib, $F_{4H}=1.5, L_c=2.5m, Q_L=16kW/m$)

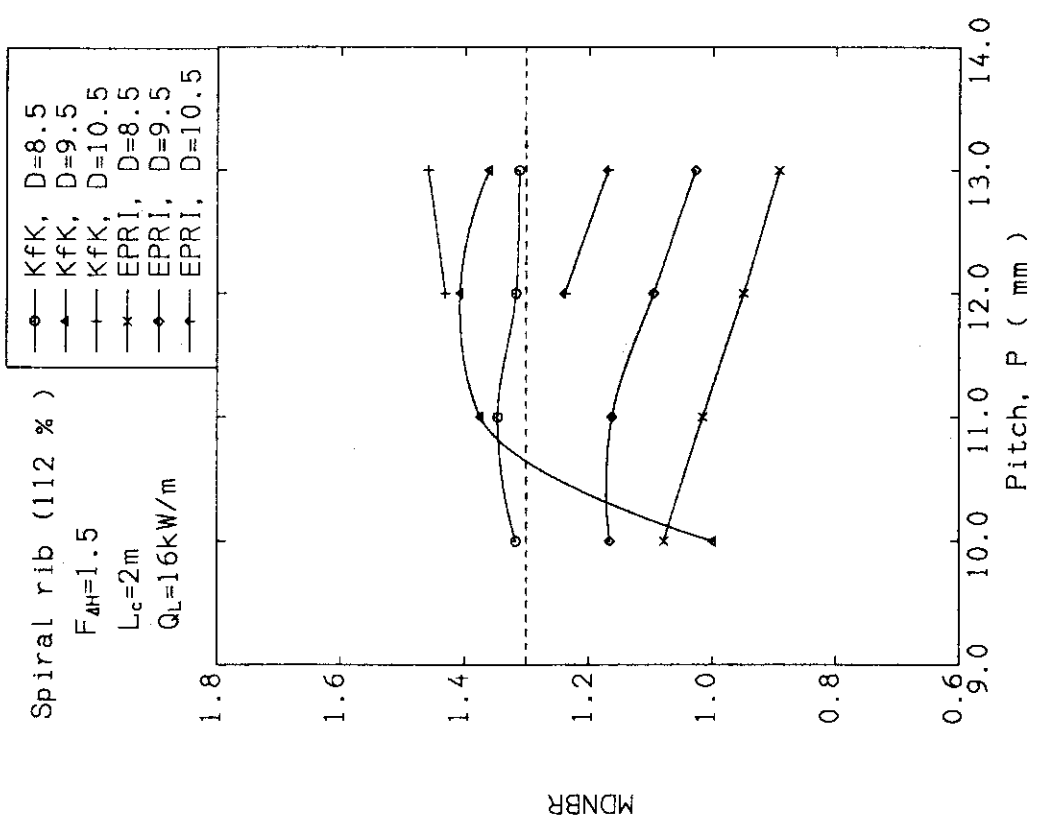


Fig.4.11 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (spiral rib, $F_{4H}=1.5, L_c=2.0m, Q_L=16kW/m$)

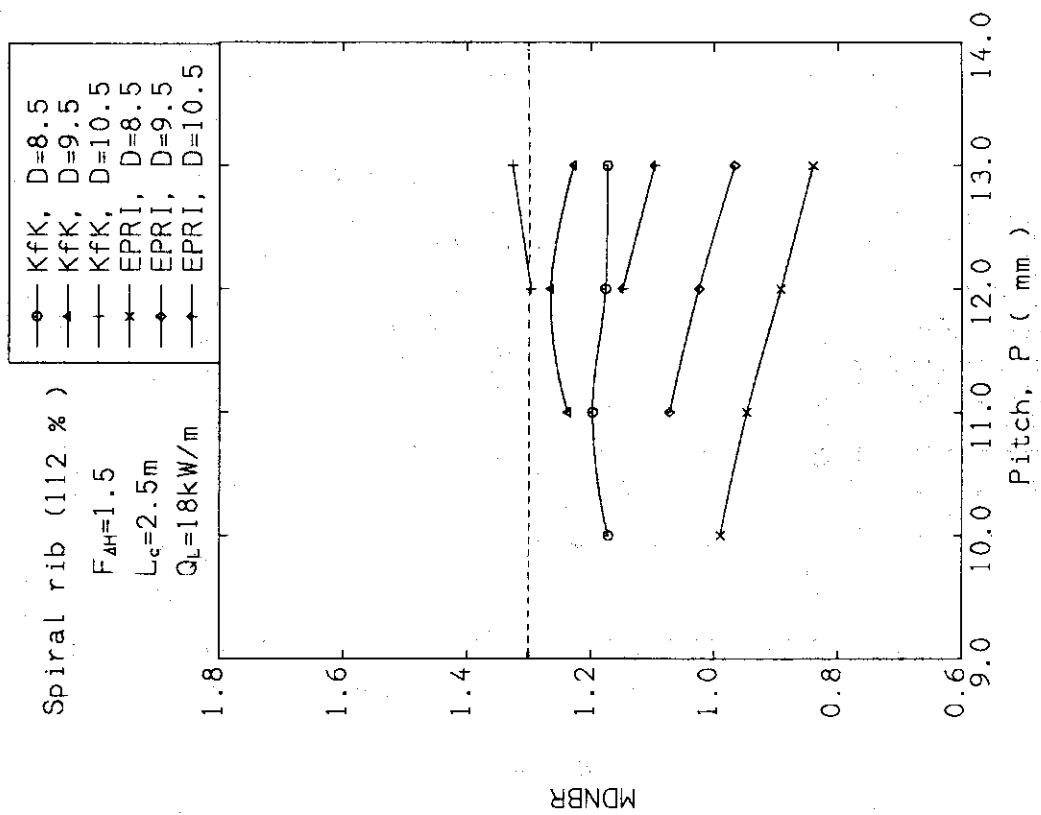


Fig.4.14 Minimum DNBR vs. pin pitch

(spiral rib, $F_{AH}=1.5, L_c=2.5m, Q_L=18kW/m$)

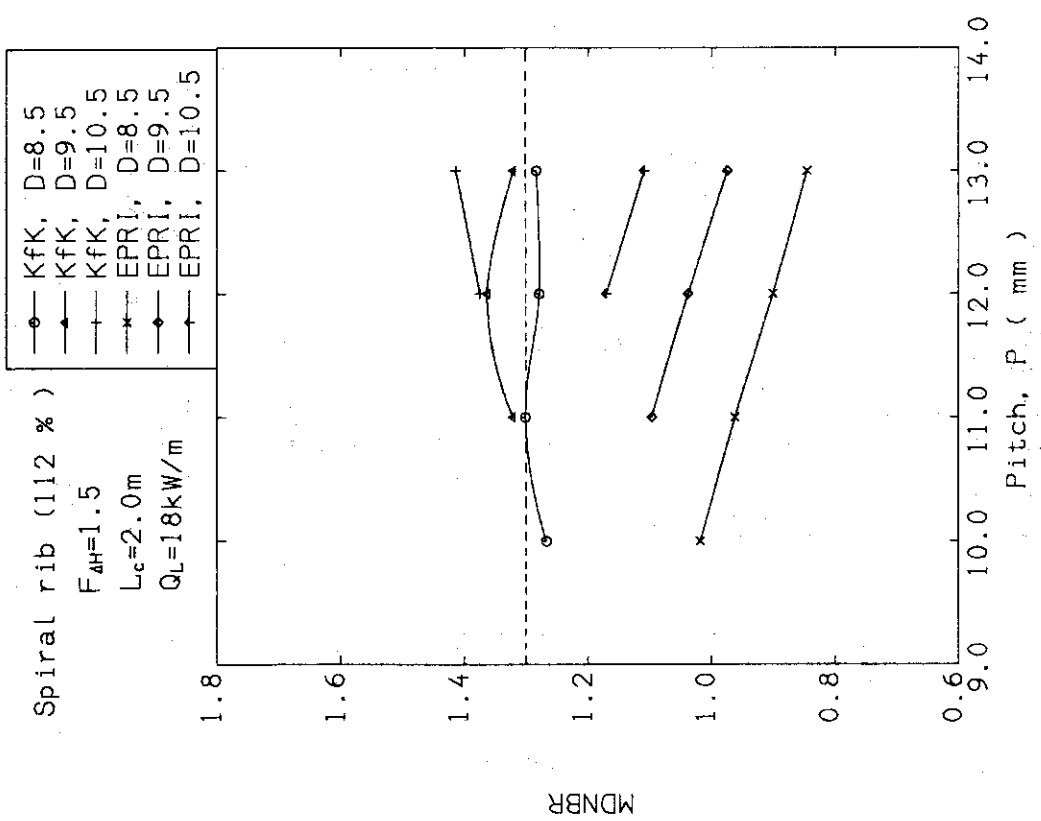


Fig.4.13 Minimum DNBR vs. pin pitch

(spiral rib, $F_{AH}=1.5, L_c=2.0m, Q_L=18kW/m$)

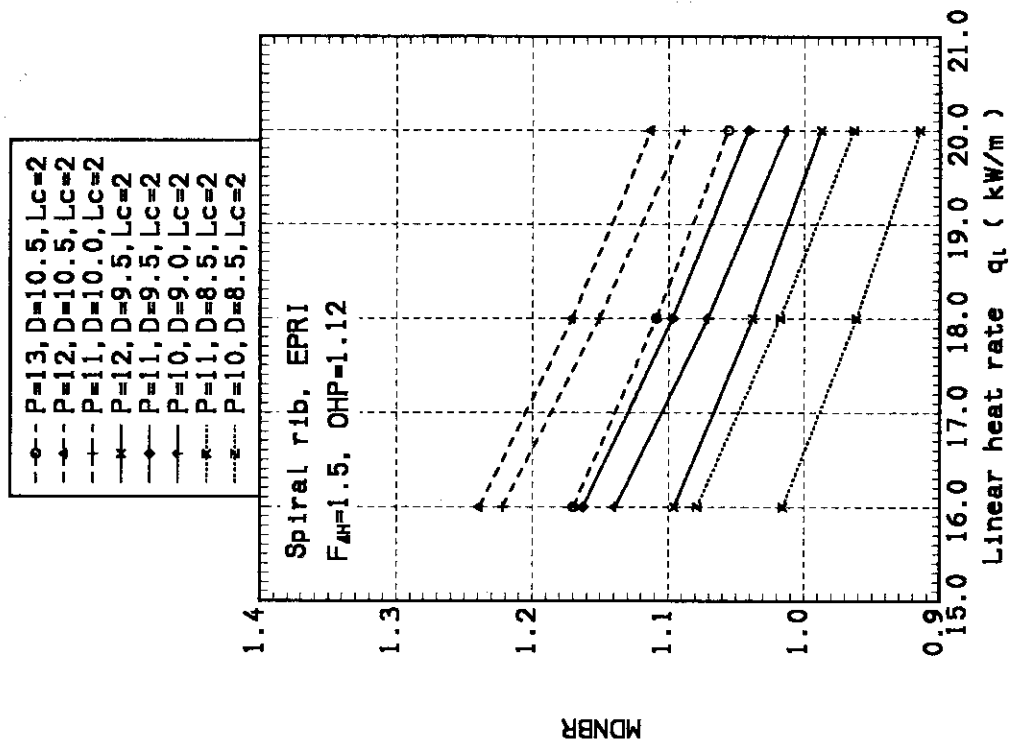


Fig.4.16 Minimum DNBR vs. linear heat rate
(EPRI correlation, spiral rib, $F_{RH}=1.5$)

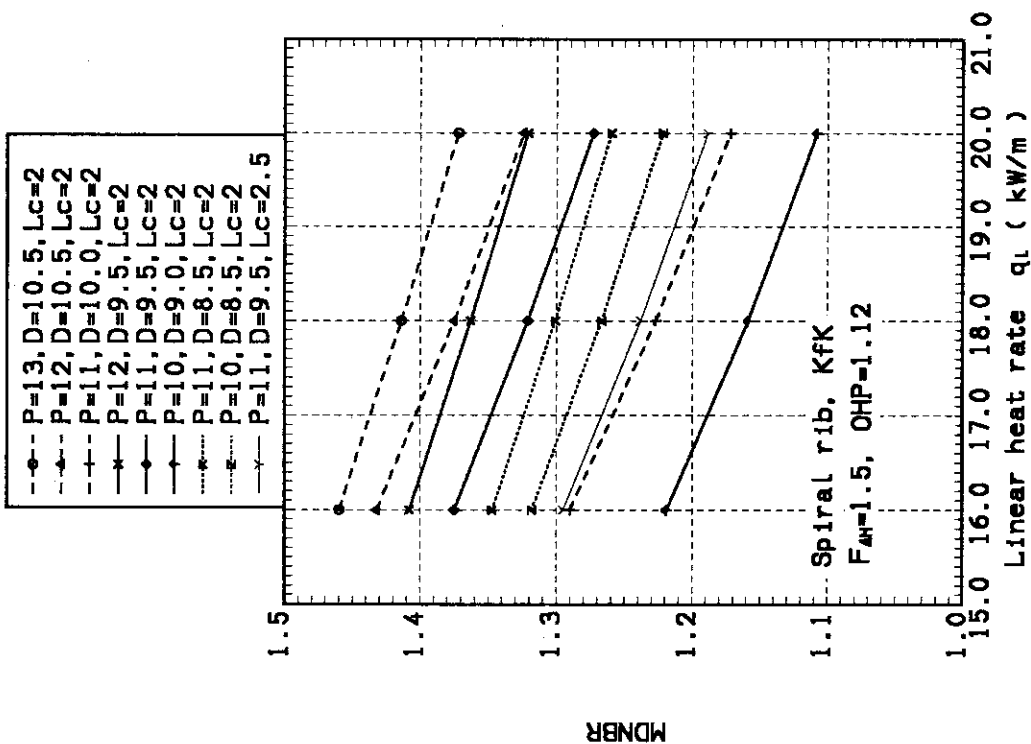


Fig.4.15 Minimum DNBR vs. linear heat rate
(KfK correlation, spiral rib, $F_{RH}=1.5$)

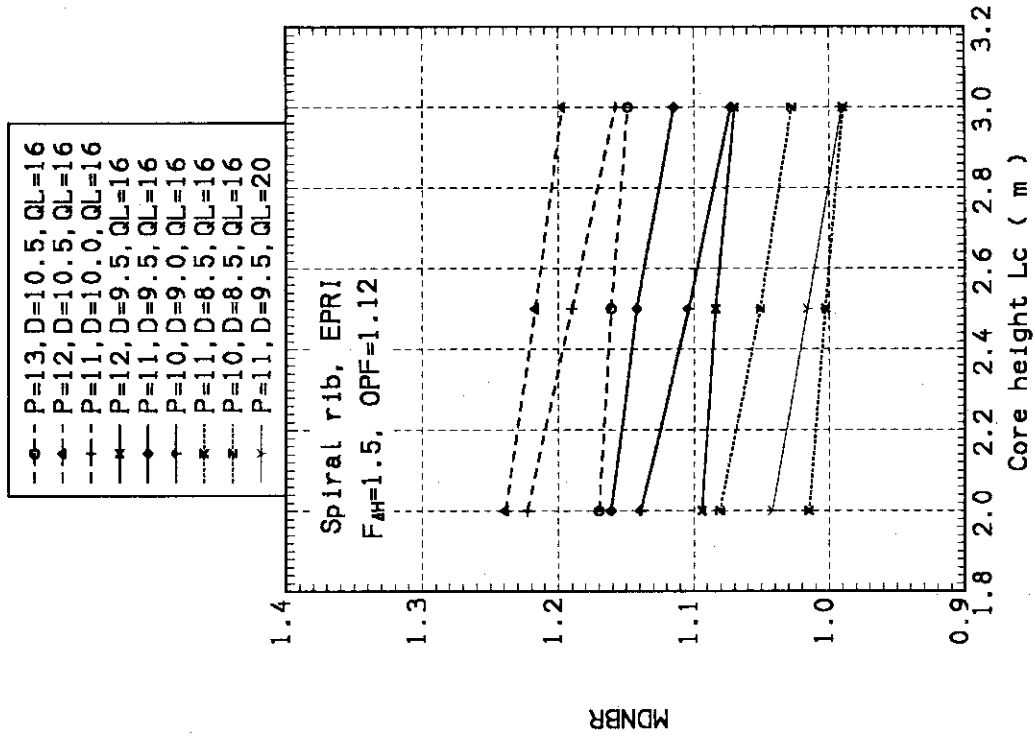


Fig.4.18 Minimum DNBR vs. core height
 (EPR correlation, spiral rib, $F_{AH}=1.5$)

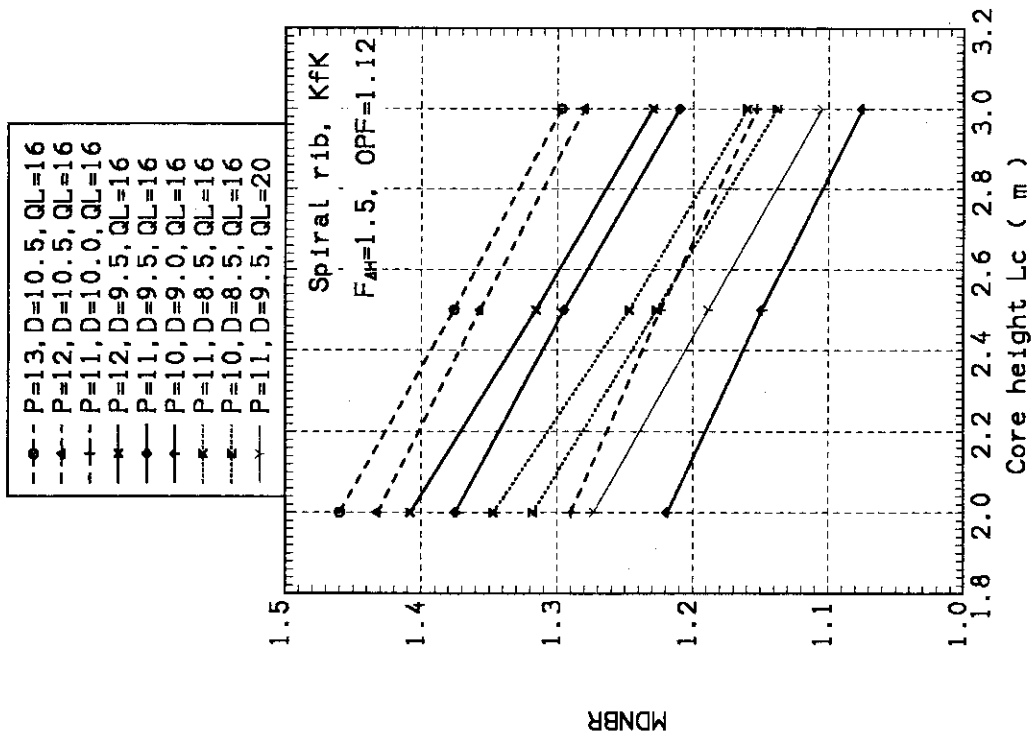


Fig.4.17 Minimum DNBR vs. core height
 (KfK correlation, spiral rib, $F_{AH}=1.5$)

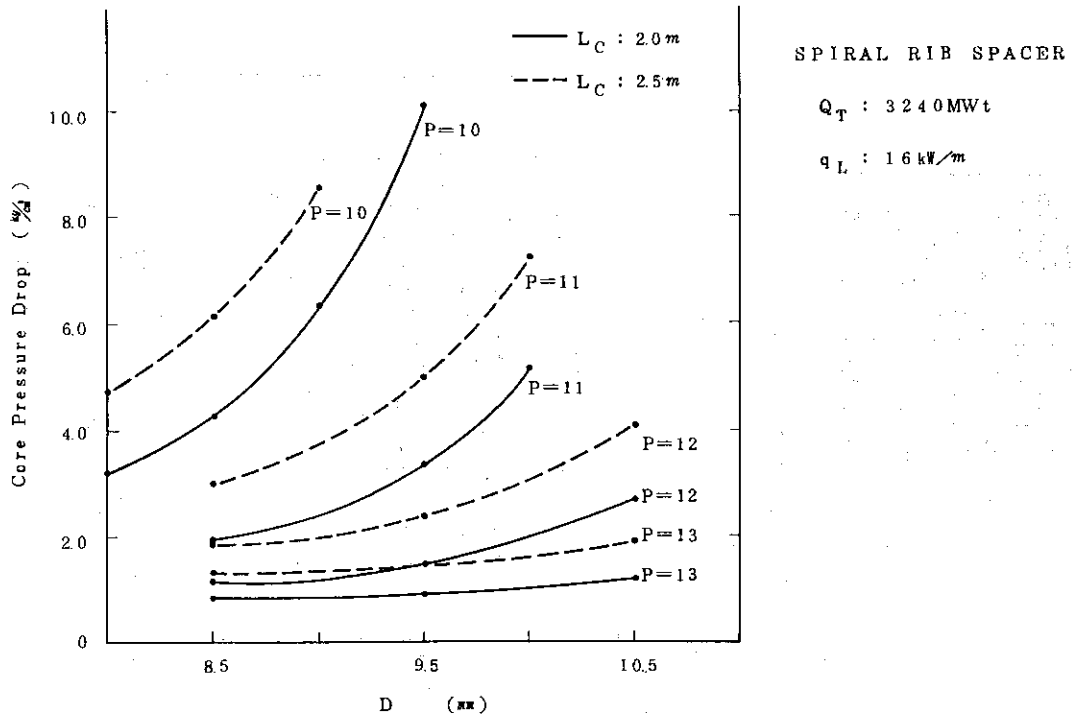


Fig.4.19 Core pressure drop vs. pin diameter (spiral rib)

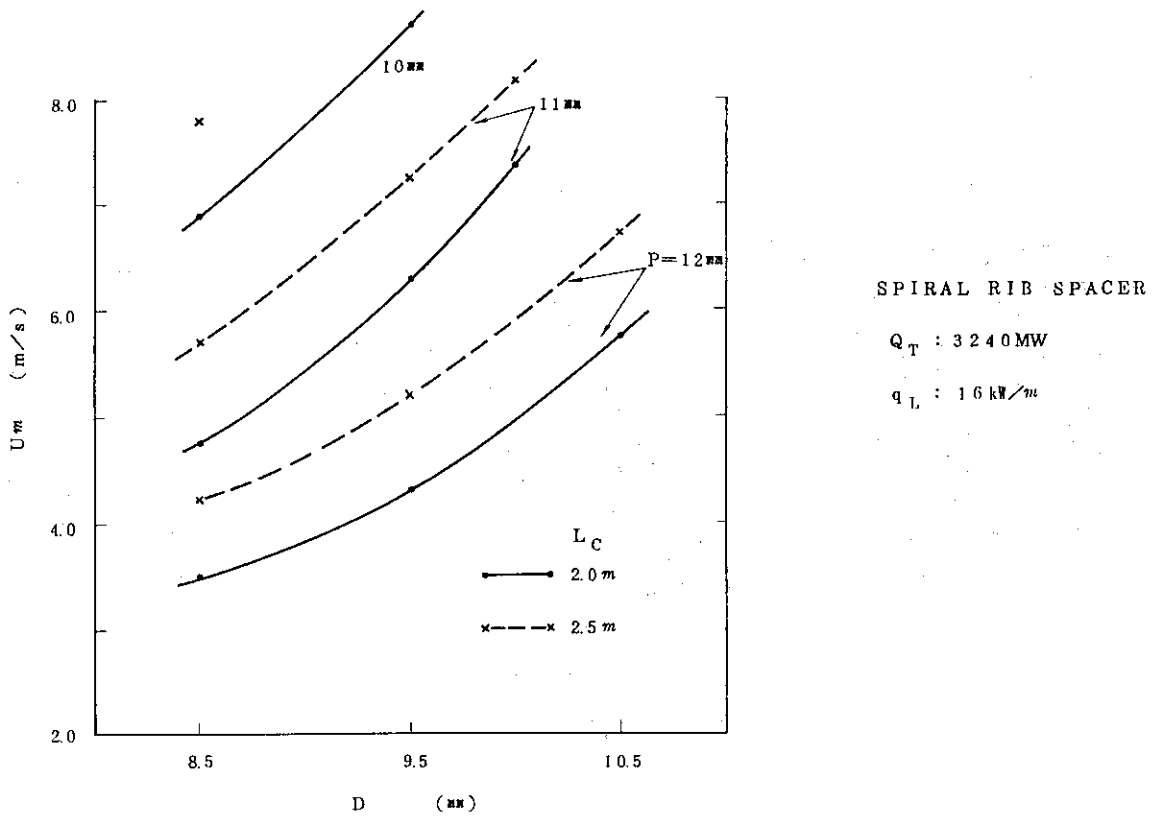


Fig.4.20 Average velocity vs. pin diameter (spiral rib)

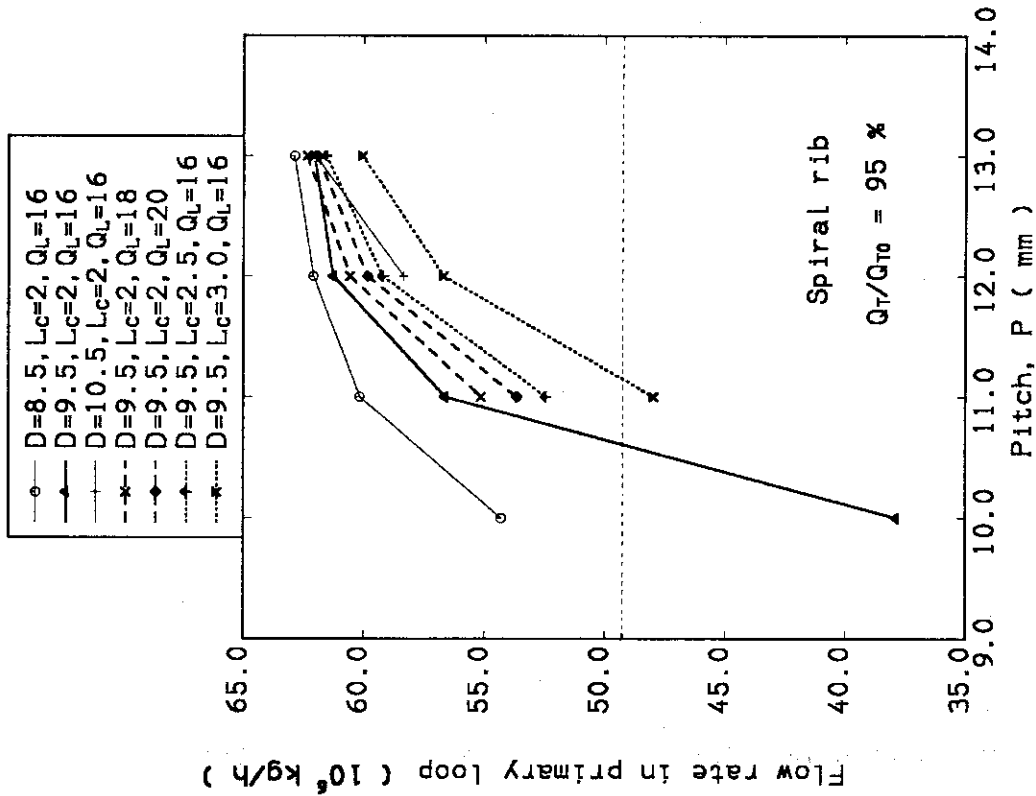


Fig.4.21 Flow rate in primary loop vs. pin pitch (spiral rib)

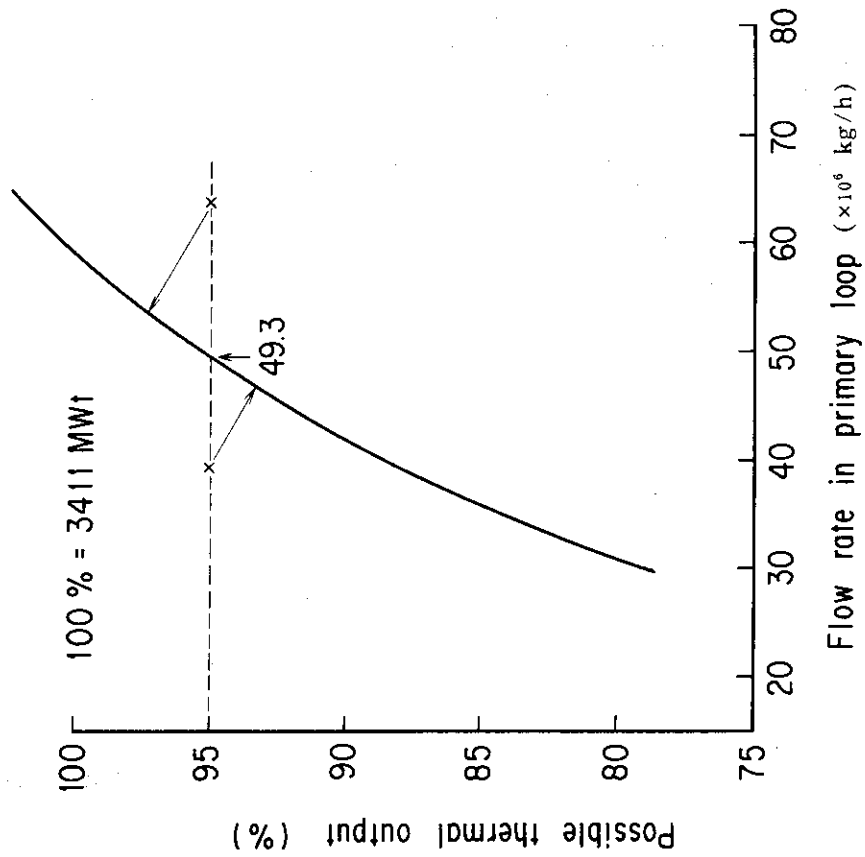


Fig.4.22 Possible reactor thermal output vs. flow rate in primary loop

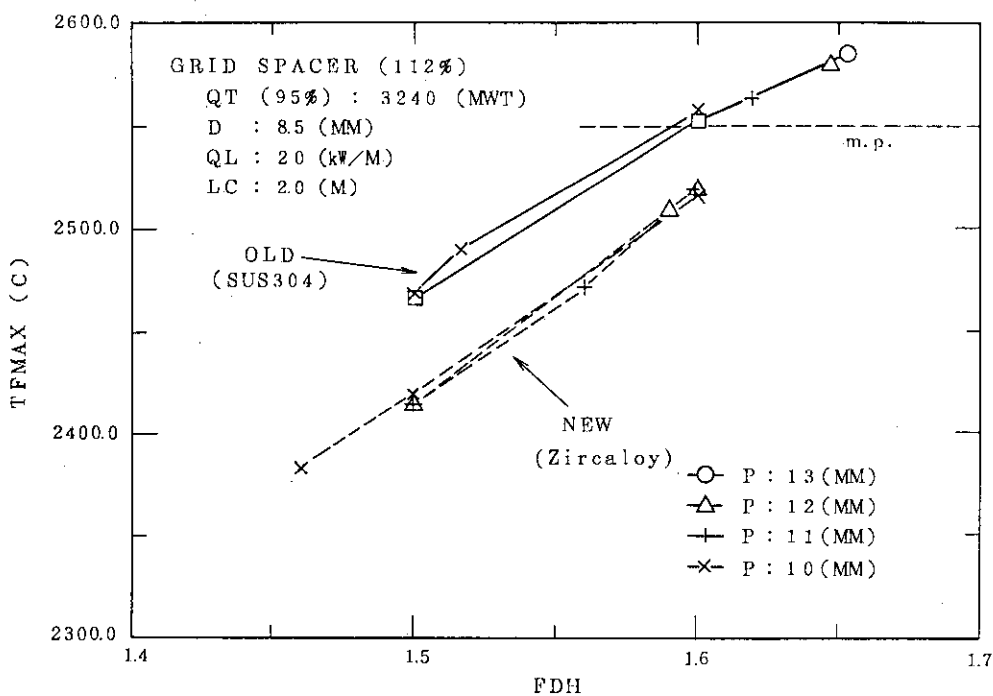


Fig.4.23 Maximum fuel temperature vs. hot channel factor (grid)

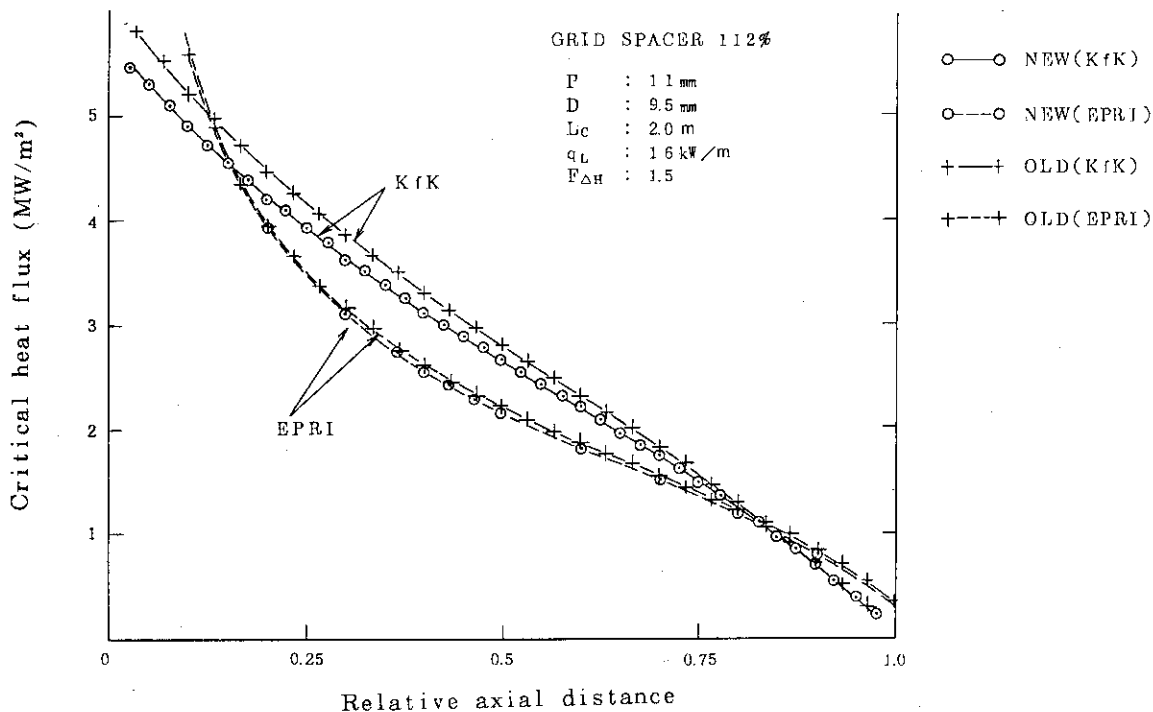


Fig.4.24 Axial distribution of DNB heat lux (grid)

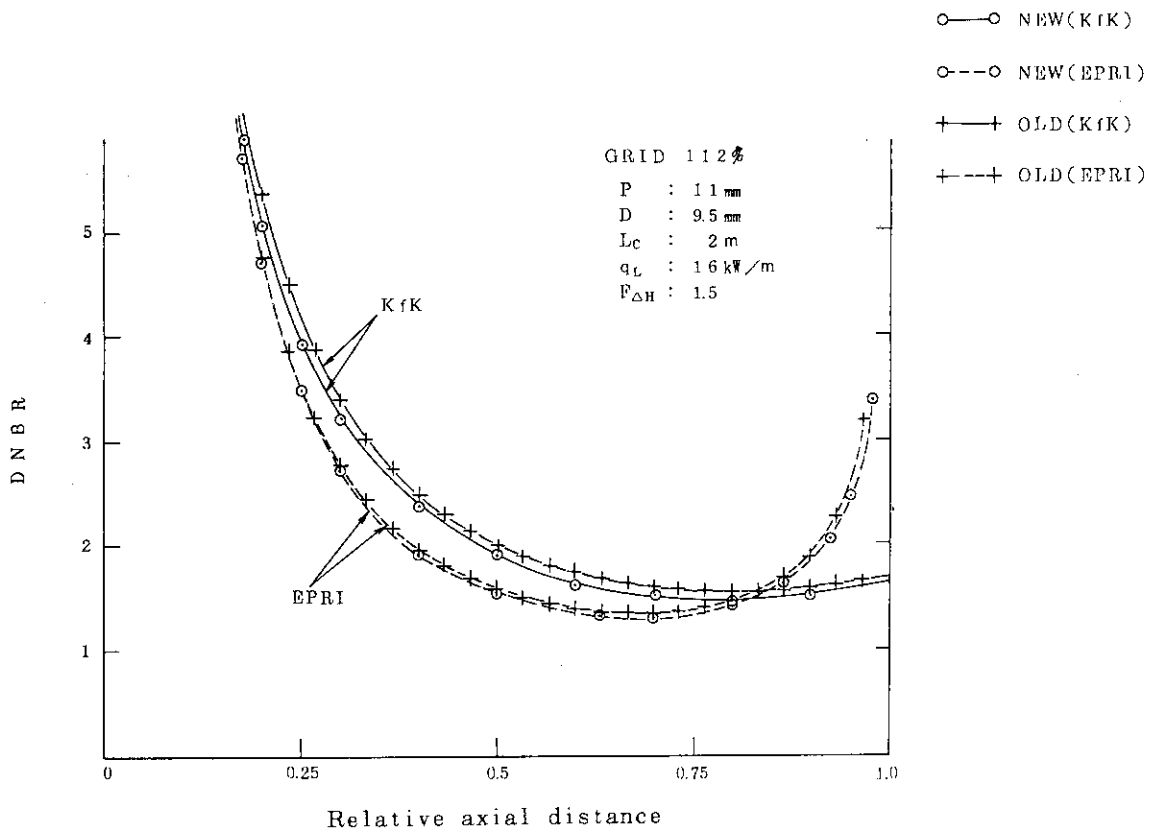


Fig.4.25 Axial distribution of DNBR (grid)

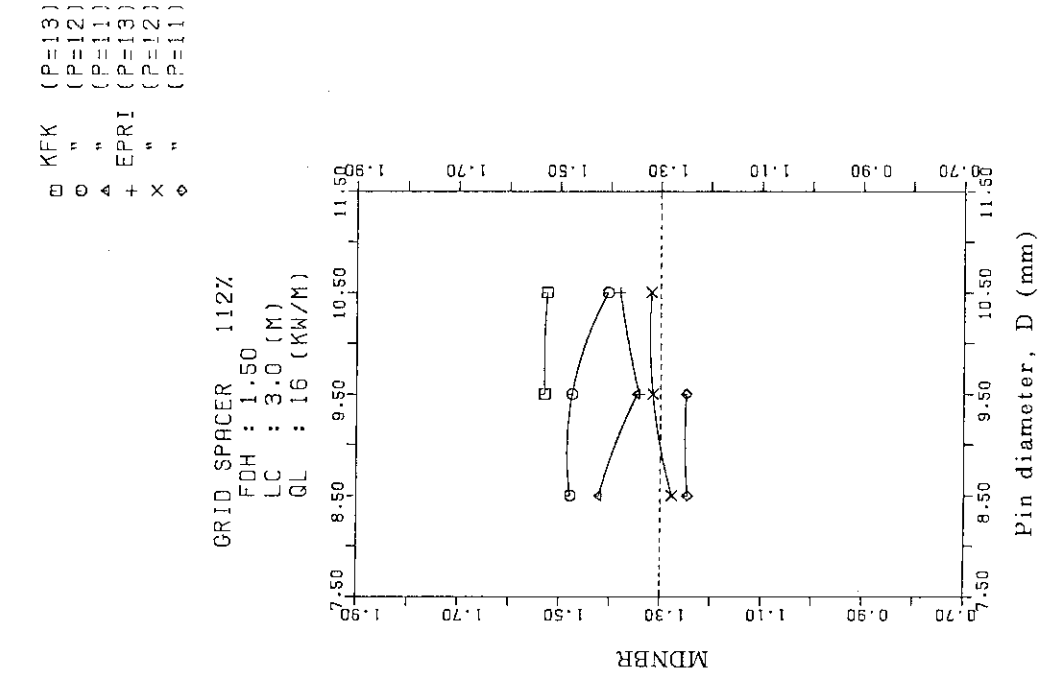


Fig.4.27 Minimum DNBR vs. pin diameter
(grid, $F_{4H}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=16kW/m$)

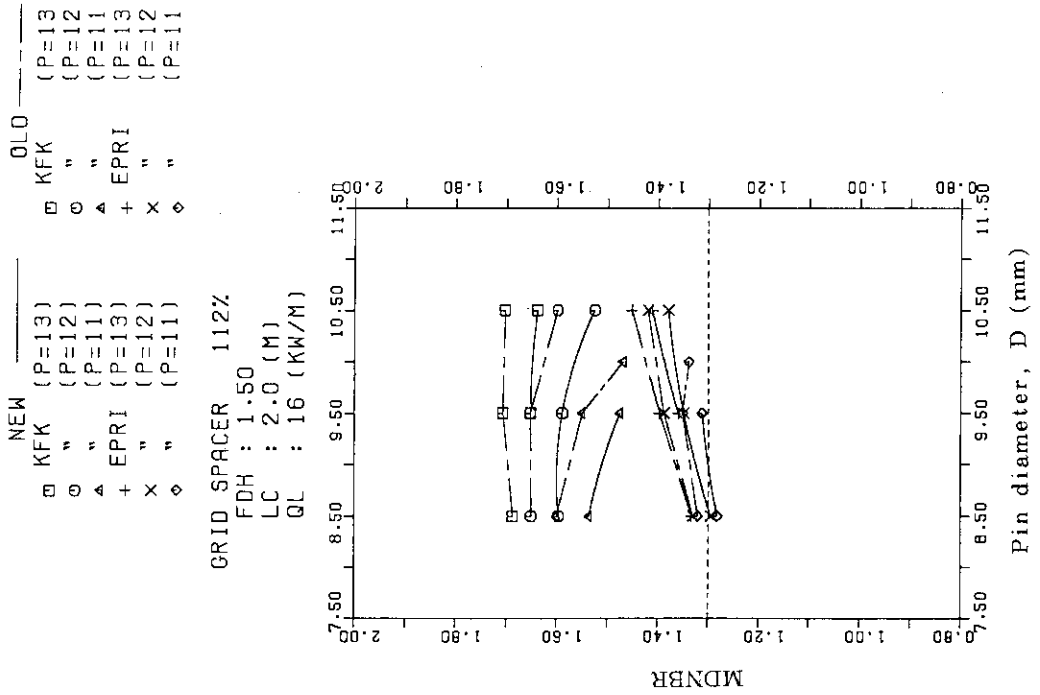


Fig.4.26 Minimum DNBR vs. pin diameter
(grid, $F_{4H}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=16kW/m$)

NEW OLD
 □ KFK (P=13) (P=13)
 ○ " (P=12) (P=12)
 △ " (P=11) (P=11)
 + EPRI (P=13) (P=13)
 × " (P=12) (P=12)
 ◇ " (P=11) (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 2.0 (M)
 QL : 18 (KW/M)

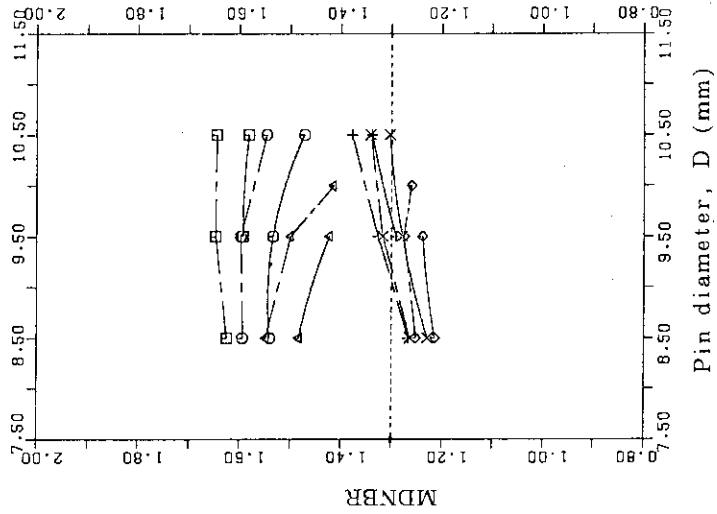


Fig.4.29 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (grid, $F_{FH}=1.5, L_c=2.0m, Q_L=18kW/m$)

□ KFK (P=13)
 ○ " (P=12)
 △ " (P=11)
 + EPRI (P=13)
 × " (P=12)
 ◇ " (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.5 (M)
 QL : 16 (KW/M)

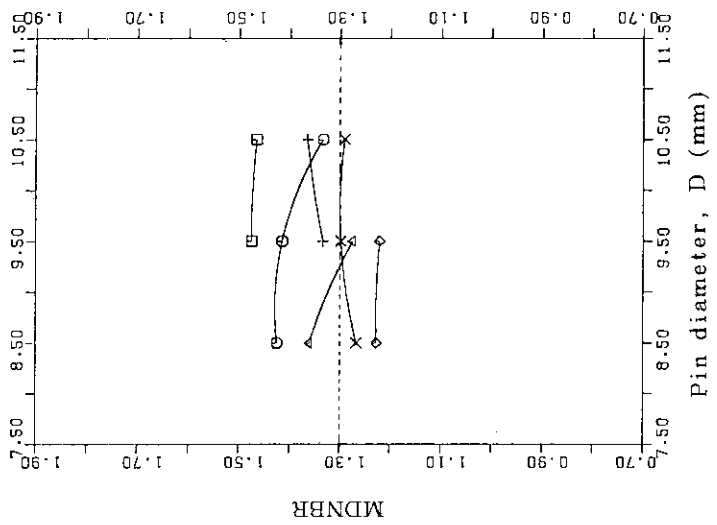


Fig.4.28 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (grid, $F_{FH}=1.5, L_c=3.5m, Q_L=16kW/m$)

□ KFK (P=13)
 ○ " (P=12)
 △ " (P=11)
 + EPRI (P=13)
 × " (P=12)
 ◇ " (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.5 (M)
 QL : 18 (KW/M)

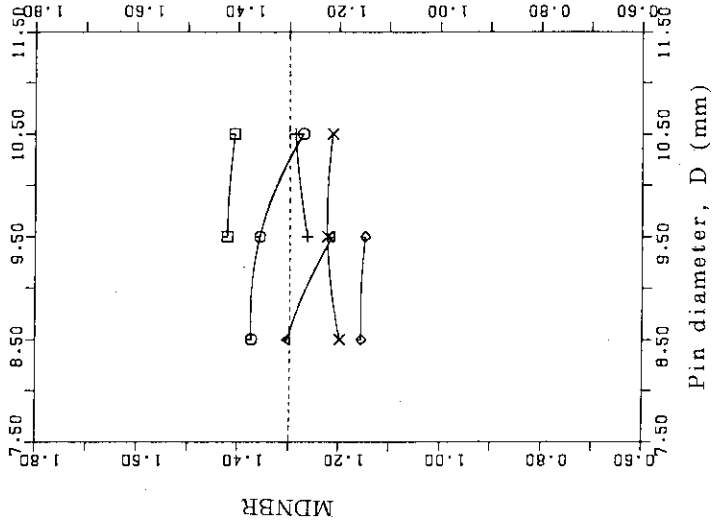


Fig.4.31 Minimum DNBR vs. pin diameter

(grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=18kW/m$)

□ KFK (P=13)
 ○ " (P=12)
 △ " (P=11)
 + EPRI (P=13)
 × " (P=12)
 ◇ " (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.0 (M)
 QL : 18 (KW/M)

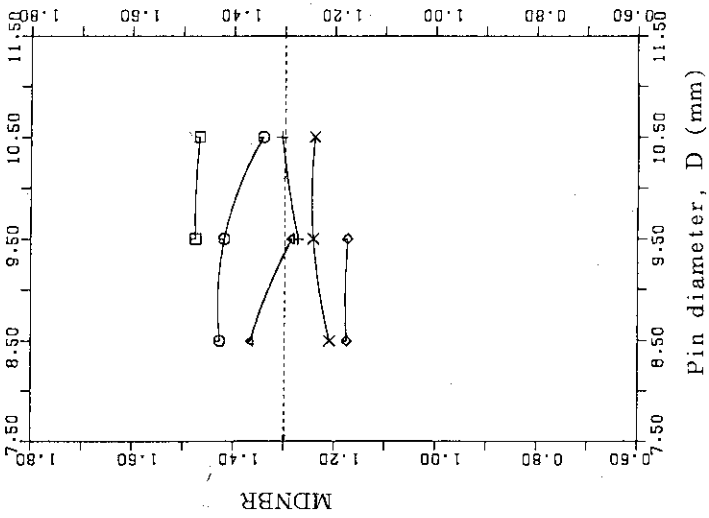


Fig.4.30 Minimum DNBR vs. pin diameter

(grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=18kW/m$)

NEW OLD

□ KFK (P=13)
 ○ " (P=12)
 △ " (P=11)
 + EPRI (P=13)
 × " (P=12)
 ◇ " (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 2.0 (M)
 QL : 20 (KW/M)

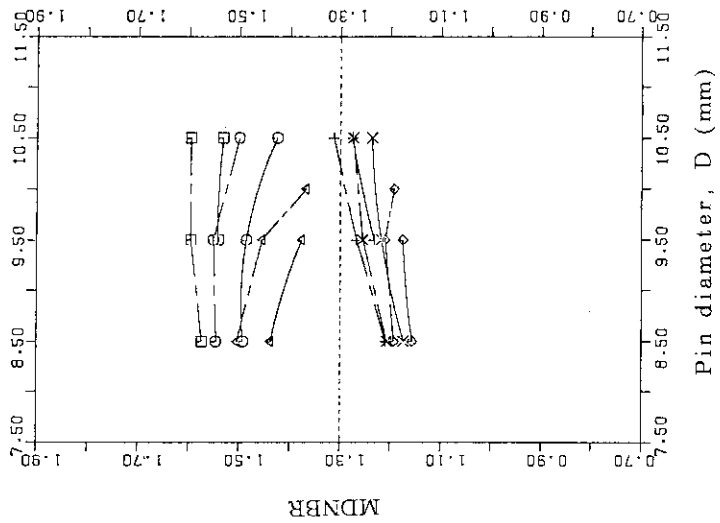


Fig. 4.32 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (grid, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=20kW/m$)

□ KFK (P=13)
 ○ " (P=12)
 △ " (P=11)
 + EPRI (P=13)
 × " (P=12)
 ◇ " (P=11)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.0 (M)
 QL : 20 (KW/M)

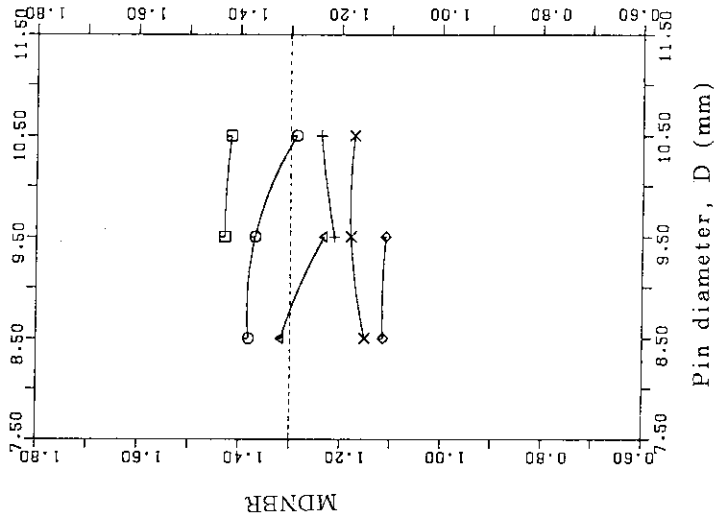


Fig. 4.33 Minimum DNBR vs. pin diameter
 (grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=20kW/m$)

NEW	OLD
□ KFK (D=8.5)	□ KFK (D=8.5)
○ " (D=9.5)	○ " (D=9.5)
△ " (D=10.5)	△ " (D=10.5)
+ EPRI (D=8.5)	+ EPRI (D=8.5)
x " (D=9.5)	x " (D=9.5)
◇ " (D=10.5)	◇ " (D=10.5)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 2.0 (M)
 QL : 16 (KW/M)

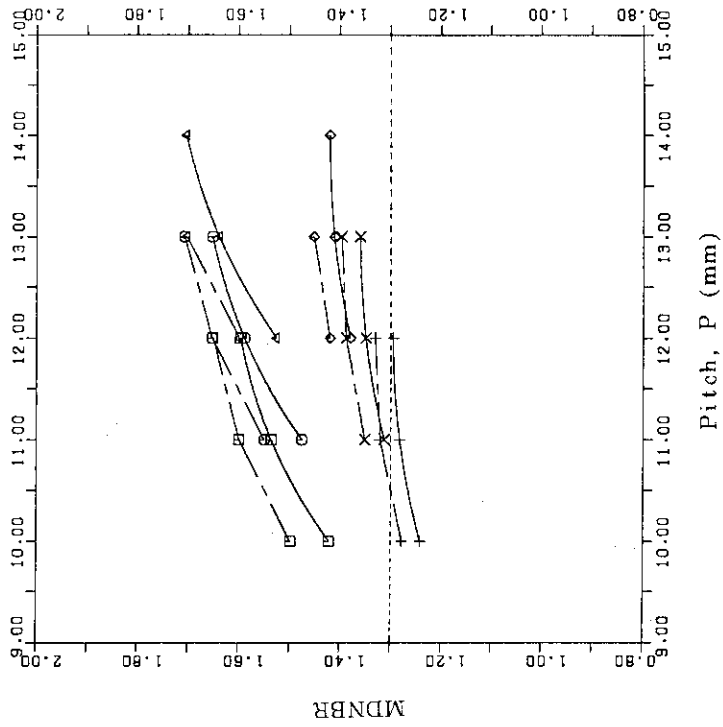


Fig. 4.35 Minimum DNBR vs. pin pitch

(grid, $F_{DH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=16kW/m$)

□ KFK (P=13)
○ " (P=12)
△ EPRI (P=13)
+ " (P=12)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.5 (M)
 QL : 20 (KW/M)

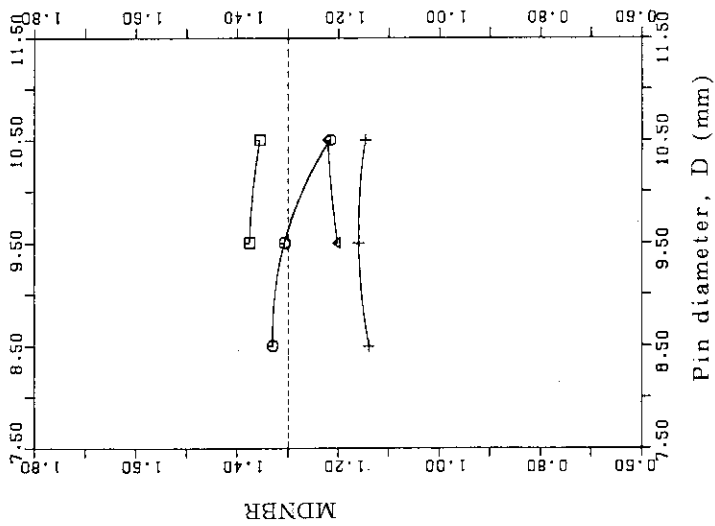


Fig. 4.34 Minimum DNBR vs. pin diameter

(grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=20kW/m$)

- KFK (D=8.5)
- " (D=9.5)
- △ " (D=10.5)
- + EPRI (D=8.5)
- x " (D=9.5)
- ◇ " (D=10.5)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.5 (M)
 QL : 16 (KW/M)

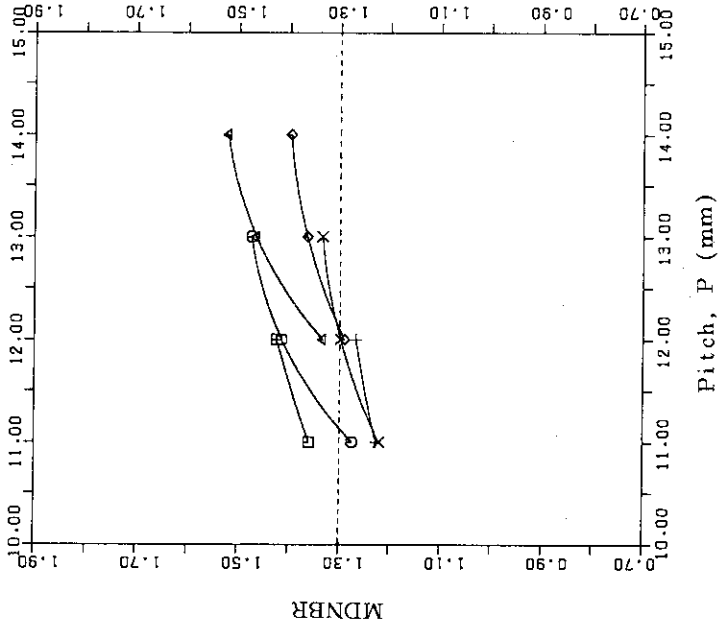


Fig.4.37 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.5m, Q_L=16kW/m$)

- KFK (D=8.5)
- " (D=9.5)
- △ " (D=10.5)
- + EPRI (D=8.5)
- x " (D=9.5)
- ◇ " (D=10.5)

GRID SPACER 112%
 FDH : 1.50
 LC : 3.0 (M)
 QL : 16 (KW/M)

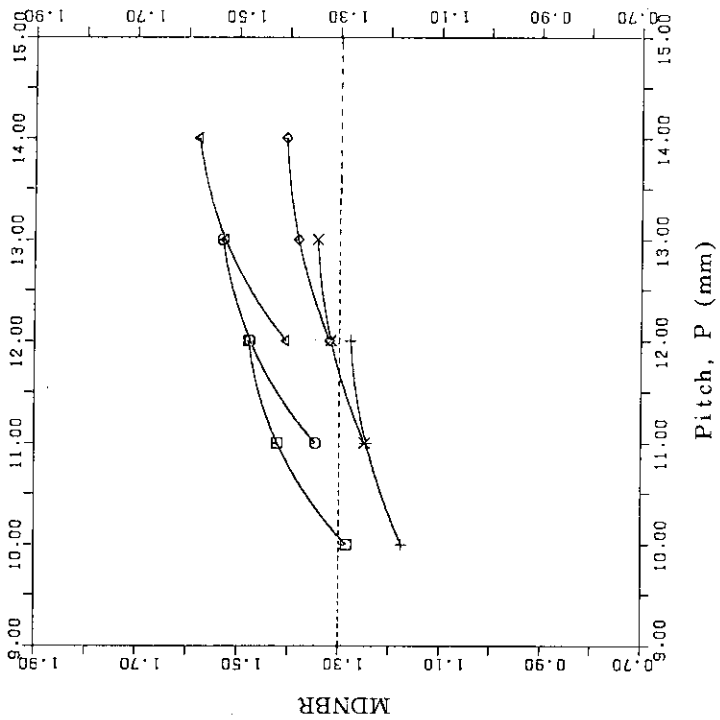


Fig.4.36 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (grid, $F_{DH}=1.5, L_C=3.0m, Q_L=16kW/m$)

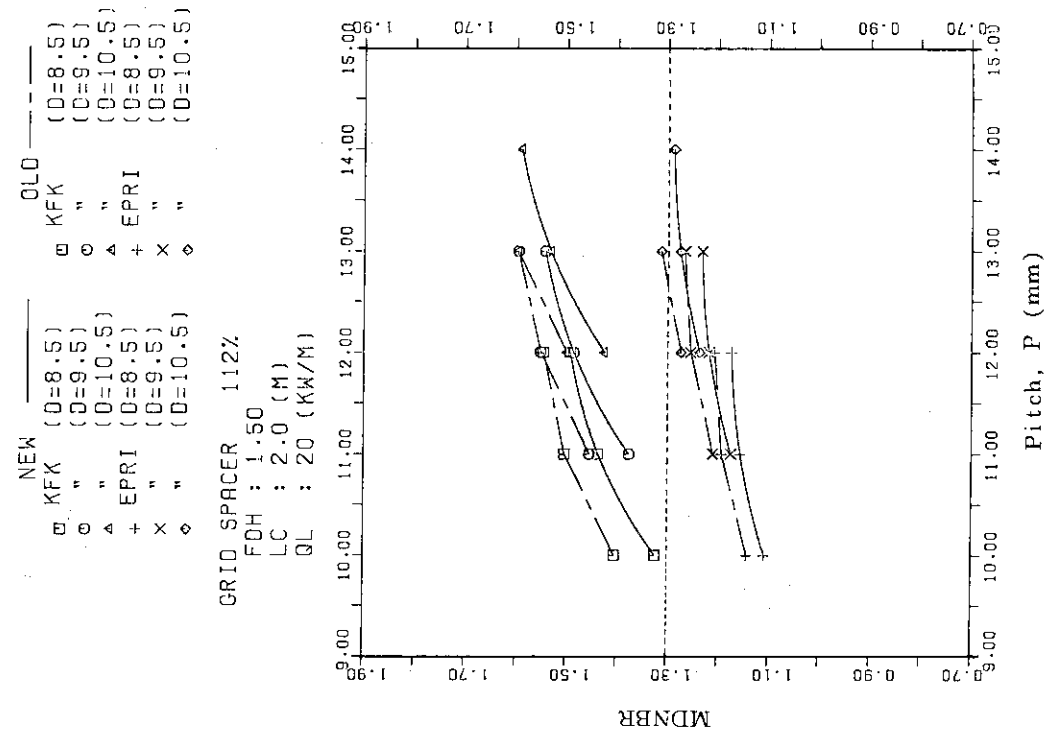


Fig.4.39 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (grid, $F_{dH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=20kW/m$)

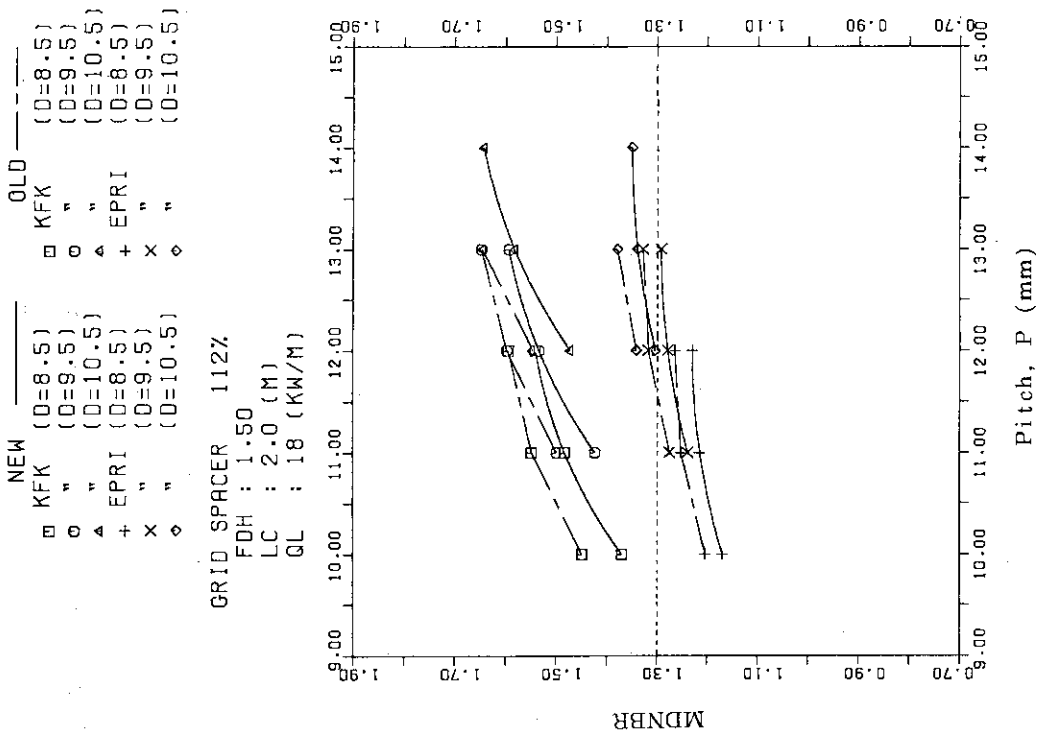


Fig.4.38 Minimum DNBR vs. pin pitch
 (grid, $F_{dH}=1.5, L_C=2.0m, Q_L=18kW/m$)

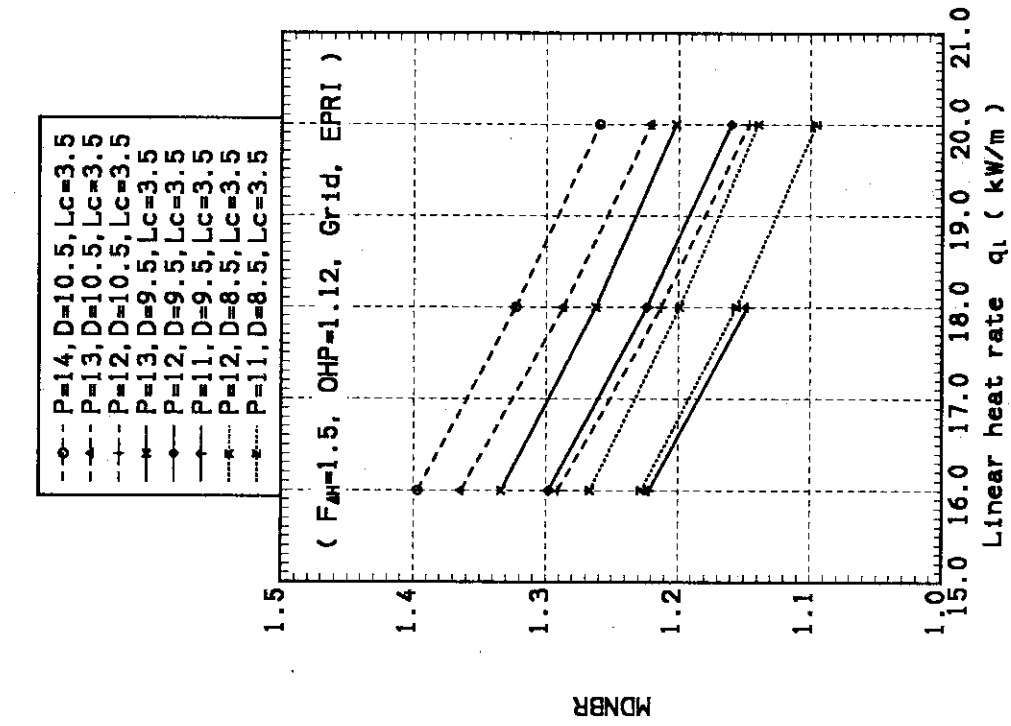


Fig.4.41 Minimum DNBR vs. linear heat rate (EPR1 correlation, grid, $F_{MH}=1.5$)

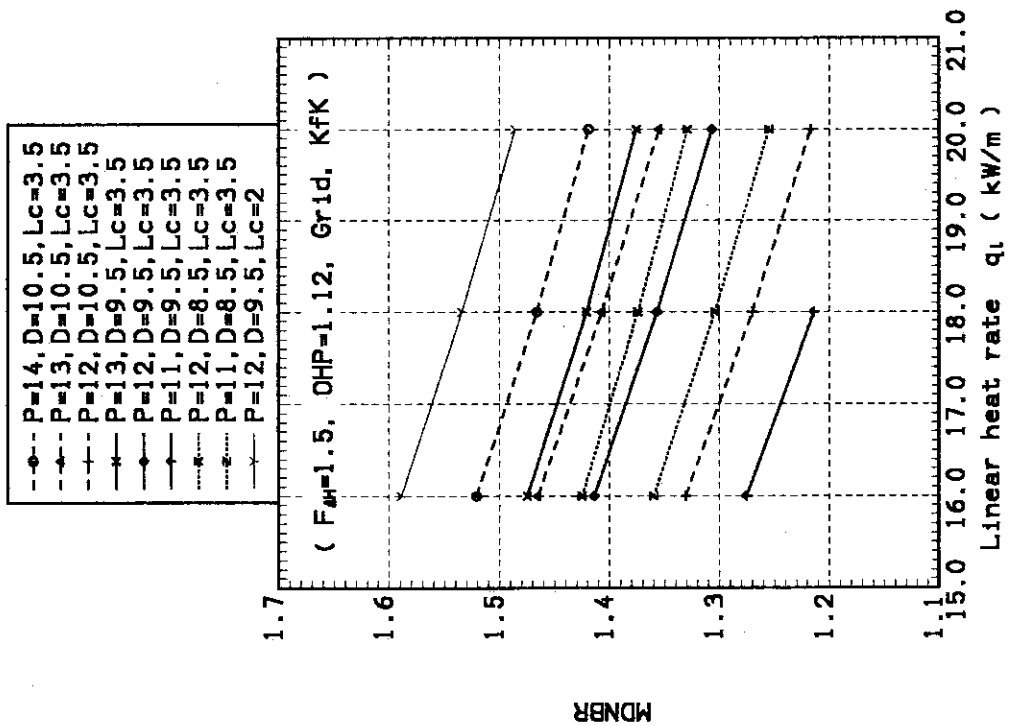


Fig.4.40 Minimum DNBR vs. linear heat rate (KfK correlation, grid, $L_{MH}=1.5$)

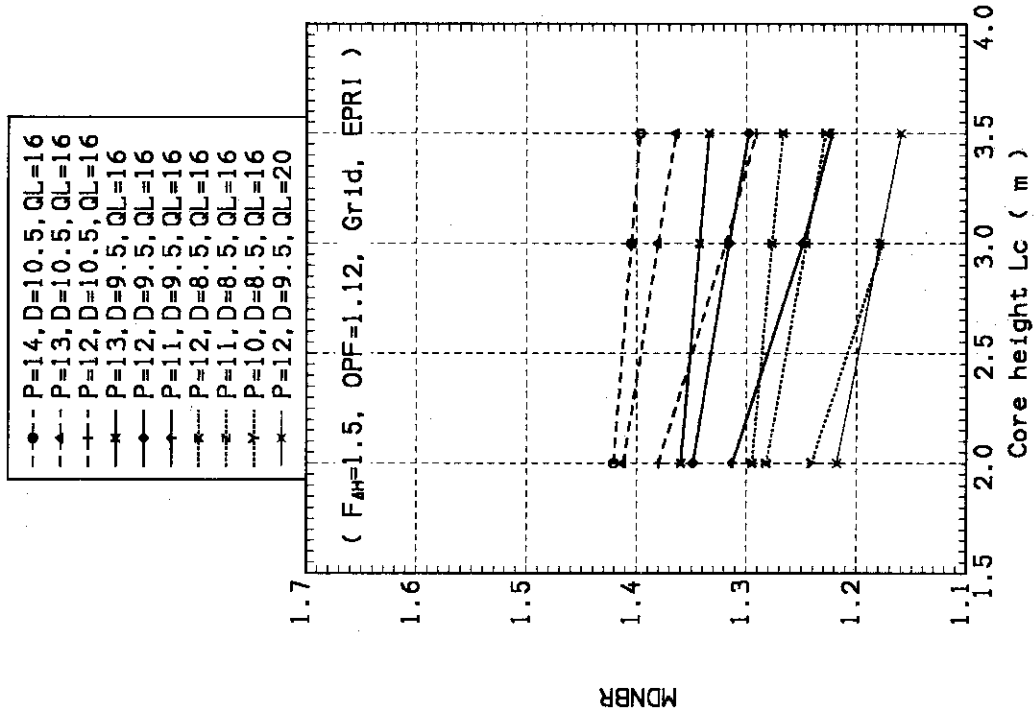


Fig.4.43 Minimum DNBR vs. core height
(EPR1 correlation, grid, $F_{AH}=1.5$)

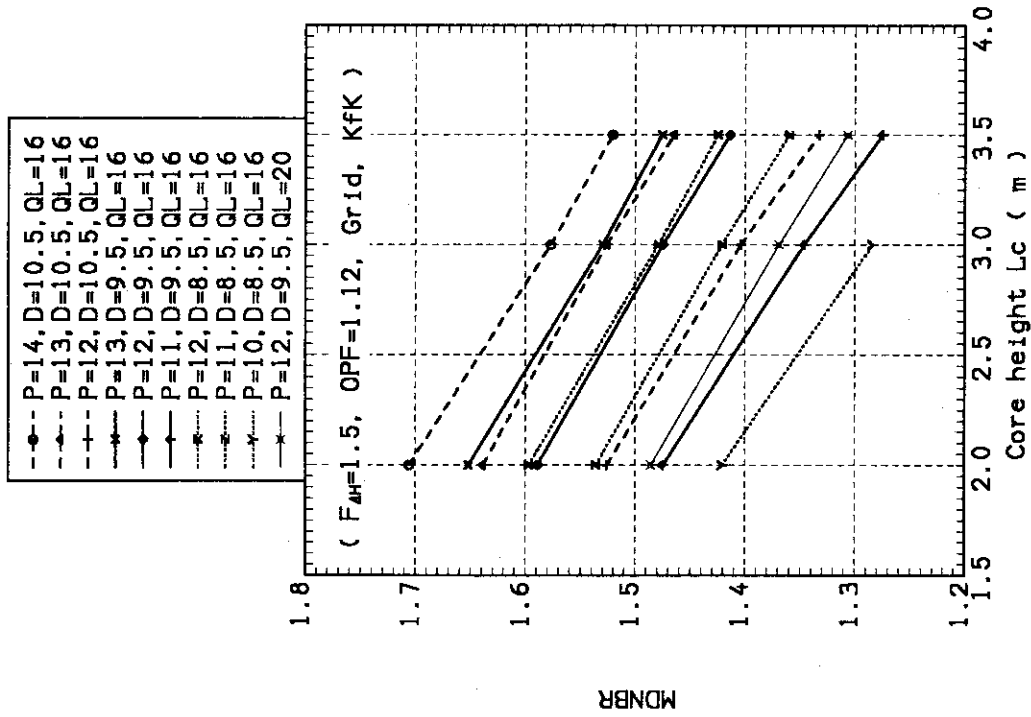


Fig.4.42 Minimum DNBR vs. core height
(KfK correlation, grid, $F_{AH}=1.5$)

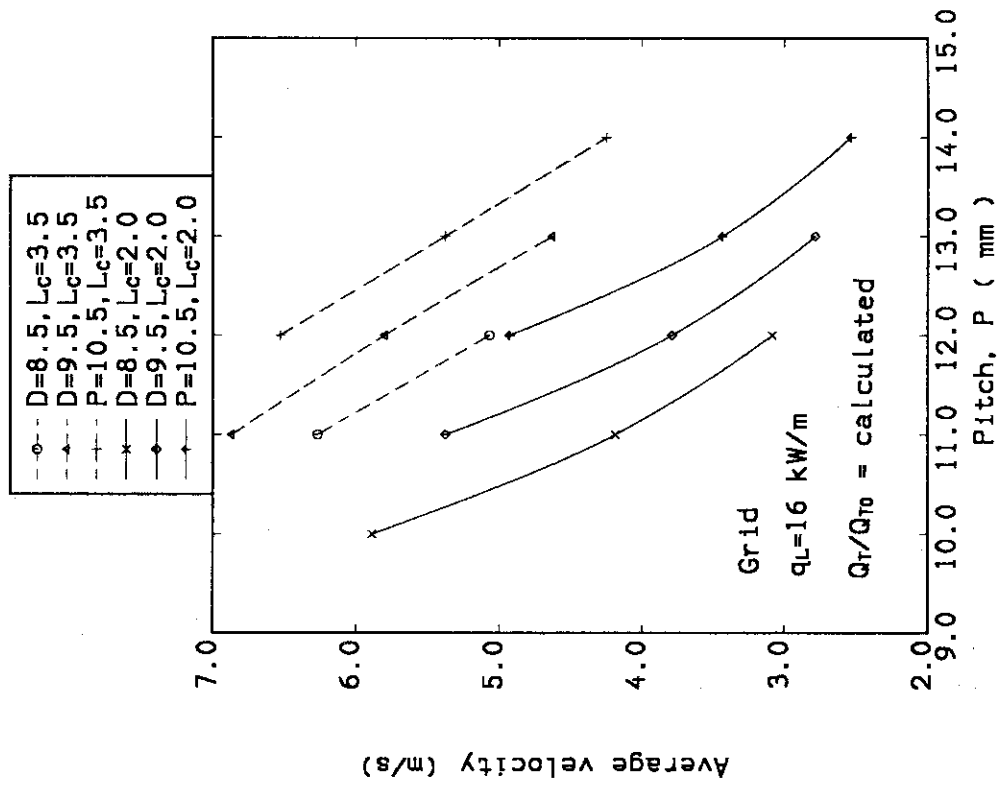


Fig.4.45 Average velocity vs. pin pitch (grid)

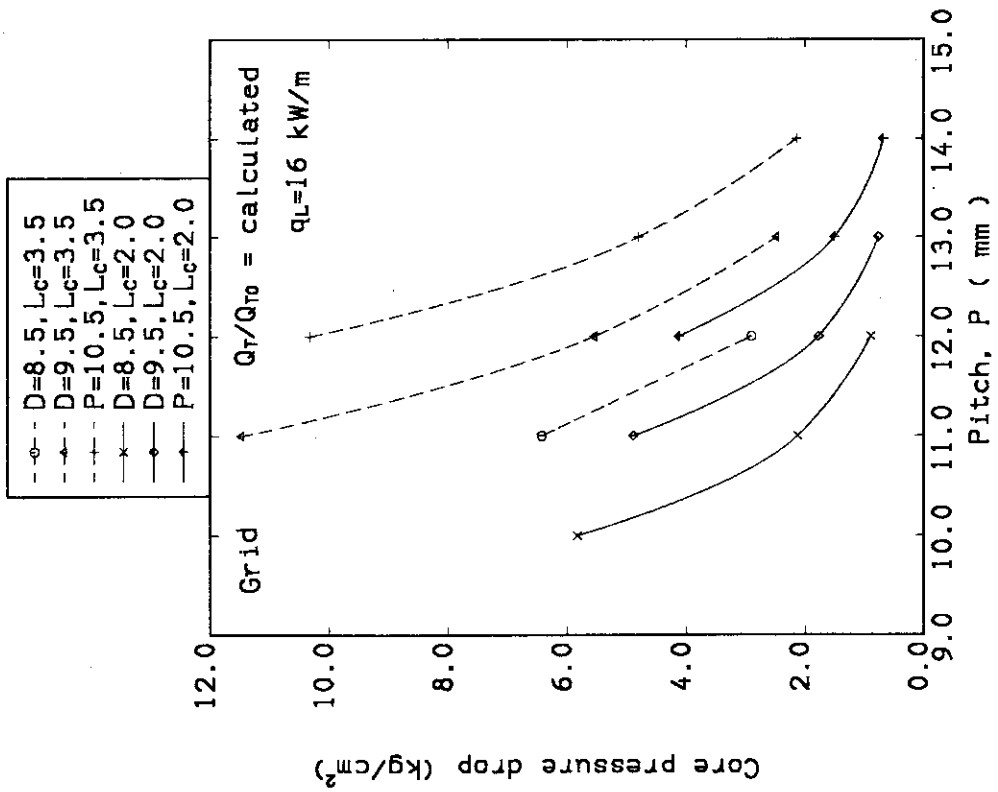


Fig.4.44 Core pressure drop vs. pin pitch (grid)

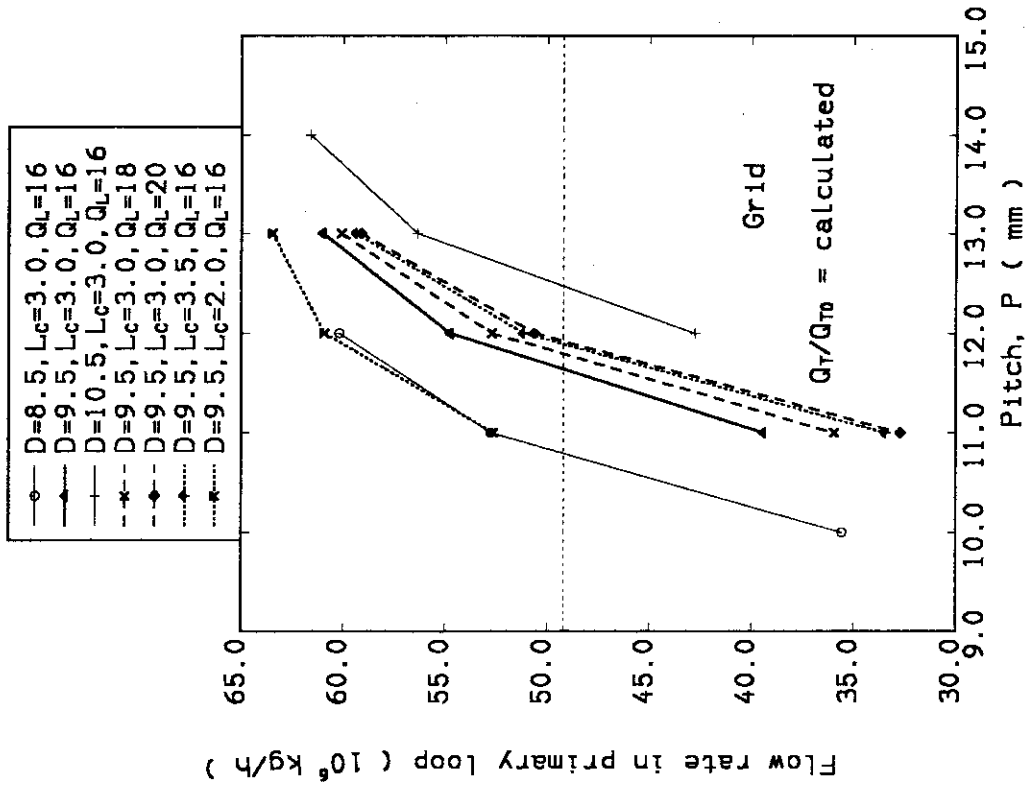


Fig.4.46 Flow rate in primary loop vs. pin pitch (grid)

5. 炉心成立性の検討

前章の結果を基に、高転換軽水炉炉心の成立する範囲を検討する。ここでは、核設計への有用な情報を提供するという観点から、炉長、線出力及びホットチャンネル因子の取りうる限界値という形で整理する。

熱流設計における炉心成立性の判断基準は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化状態に対して以下の通りである。

① 燃料ペレットが溶融しない。

燃料最高温度が、燃焼初期で2550℃、50 GWd/t 時で2390℃(10 GWd/tにつき32℃低下)以下で確保することにより満足する。但し、前章に示したように、本条件は常に満足しており、ここでは言及しない。

② 冷却材が遷移沸騰を生じない。

最少DNBRが1.3以上を確保していることで満足する。この限界となるホットチャンネル因子を F_{DH}^{13} とおく。^{A)}

③ ホットチャンネルでも飽和沸騰を生じない。

この限界となるホットチャンネル因子を F_{DH}^S とおく。これは第2.2.3(1)節における F_{DH}^S に等しい。

④ 製作性を有している。

(i) スパイラルリブスペーサの製作可能範囲として、ロッド間ギャップが2mm以内を目安とする。

(ii) グリッドスペーサの製作可能範囲として、ロッド間ギャップが少なくとも2mm有ること。

⑤ 原子炉熱出力が参考とした現用PWRの値から5%以上低下しない。

DNBR等が最も厳しくなる運転時の過渡状態として、前述のように本研究では112%過負荷時を想定している。しかし、現用PWRにおいては定常運転時の最小DNBRは1.8程度であることを考えると、さらにマージンを取る必要があるかもしれない。

二つのDNB相関式の結果は前章で示したようになり異なる場合もあるが、原研で行われた高転換軽水炉限界熱流束実験の結果²⁹⁾をふまえて、ここでは主にKfK相関式の結果を基礎とする。

(1) ホットチャンネル因子

上記判断基準に基づき、Fig.5.1～5.6にスパイラルリブスペーサ型炉心、Fig.5.7～5.34にグリッドスペーサ型炉心の場合のホットチャンネル因子の取りうる範囲(図中の斜線部

A) 原子力安全審査指針改訂4版(1988年)によれば、PWR炉心熱設計のために新しく作成されたDNB相関式を用いた場合の最小DNBRの許容限界値は1.17となっているが、ここではKfK及びEPR Iの設計例にみられる基準に従った。

分)を示した。

スパイラルリブスペーサ型炉心に対しては Fig.5.1～5.6 から以下のことが分かる。

- i) ほとんどの場合 F_{DH}^{LS} で制限されている。
- ii) 燃料温度の制限は F_{DH}^{LS} よりも厳しくはないので図中には示していない。
- iii) 原子炉出力低下が5%以内という条件もほとんどの場合満足している。D = 9.5 mm, $q_L = 16 \text{ kw/m}$, $L_C = 2 \text{ m}$ 及び D = 8.5 mm, $q_L = 18 \text{ kw/m}$, $L_C = 2.5 \text{ m}$ の場合には, それぞれ, $P < 10.5 \text{ mm}$, $P < 10.2 \text{ mm}$ の範囲で出力低下が5%以上となっている。なお, この条件は, 一次系流量によって決まる F_{DH}^S に対する $F_{DH}^S > 1.5$ という条件とほぼ等価なものとなっている ($F_{DH}^S > 1.5$ の方が少し厳しい)。
- iv) DNB 相関式として E P R I 相関式を用いた場合には, 取りうるホットチャンネル因子は非常に小さくなる。

グリッドスペーサ型炉心に対しては, Fig.5.7～5.34 から以下の事が分かる。

- i) グリッドの圧損係数の異なる結果 (図中, OLD と NEW) では F_{DH}^{LS} 及び F_{DH}^S の取りうる限界は, 3～5%変化する。
- ii) F_{DH}^{LS} と F_{DH}^S の制限値については一般に

$$F_{DH}^{LS} (\text{E P R I 相関式}) < F_{DH}^S < F_{DH}^{LS} (\text{K f K 相関式})$$

の関係がある。したがって, K f K 相関式の結果からは F_{DH}^S が制限となる。

- iii) 原子炉熱出力が制限となるのは, ピン径が 8.5 mm 及び 9.5 mm では炉心高さが 3 m 以上の場合, ピン径 10.5 mm では炉心高さが 3 m 以上, 線出力が 18 kw/m 以上の場合である。すなわち, 炉心圧損が高くなる場合であり, 前述の通り, この条件は $F_{DH}^S > 1.5$ とほぼ等価な条件となっている。

なお, ここで述べたホットチャンネル因子は熱流力的な意味での因子である。すなわち, 本因子は, 工学的な不確定性を既に含んでいる。この大きさを現用 PWR と同程度とした場合, 工学的熱流束熱水路係数には, 核的不確定因子 (F_U^N) として 1.05, 制作公差等 (F_Q^E) として 1.03 が含まれる。従って, 核的な径方向出力分布係数 F_{DH}^N の取りうる上限値は, ここで求めた F_{DH} の上限値と以下の関係がある。

$$F_{DH}^N \text{ の上限値} = \frac{F_{DH} \text{ の上限値}}{1.03 \times 1.05}$$

(2) 炉心高さ

上記判断基準を満足する炉心高さの限界を, 線出力 16 kw/m, $F_{DH} = 1.5$ の場合について Fig.5.35 (スパイラルリブスペーサ型炉心), Fig.5.36 (グリッドスペーサ型炉心) に示す。この時, ホットチャンネルでも飽和沸騰を生じないためには $F_{DH}^S \geq 1.5$ を満足していなければならない。なお, $F_{DH}^S \geq 1.5$ を満足していれば炉心出力低下が5%以内であるという条件は自動的に満たしている。

スパイラルリブスペーサ型炉心では $F_{DH}^S \geq 1.5$ は制限因子とならないので図中には示していない。なお, 線出力密度, ホットチャンネル因子の異なる場合については, 第 4.1 (2) 節の結

果から推定できる。すなわち、

線出力 1 kw/m 増加：可能な炉心高さ 0.13 ~ 0.2 m 減少

F_{DH} が 0.01 減少： " 0.05 ~ 0.06 m 増加

一方、グリッドスペーサ型炉心では、稠密側で飽和沸騰条件 ($F_{DH}^S > 1.5$)、ルース側で遷移沸騰条件 (最小 DNBR > 1.3) により炉心高さが制限されているが、スパイラルリブスペーサ型炉心より高い炉心が可能である。この場合、最小 DNBR > 1.3 による制限は、

線出力 1 kw/m 増加：可能な炉心高さ 0.19 ~ 0.27 m 減少

F_{DH} が 0.01 減少： " 約 0.07 m 増加

但し、 $F_{DH}^S > 1.5$ の条件は炉心出力低下が 5% 以内ということも表わしているので変化しない。

(3) 線出力

熱流力的に成立する線出力の上限値をスパイラルリブスペーサ型炉心、グリッドスペーサ型炉心に対して、Fig. 5.35 と Fig. 5.37 に示す。この場合にも、可能な炉心高さと同様の傾向がみられる。

スパイラルリブスペーサ型炉心では最小 DNBR > 1.3 の制限は、

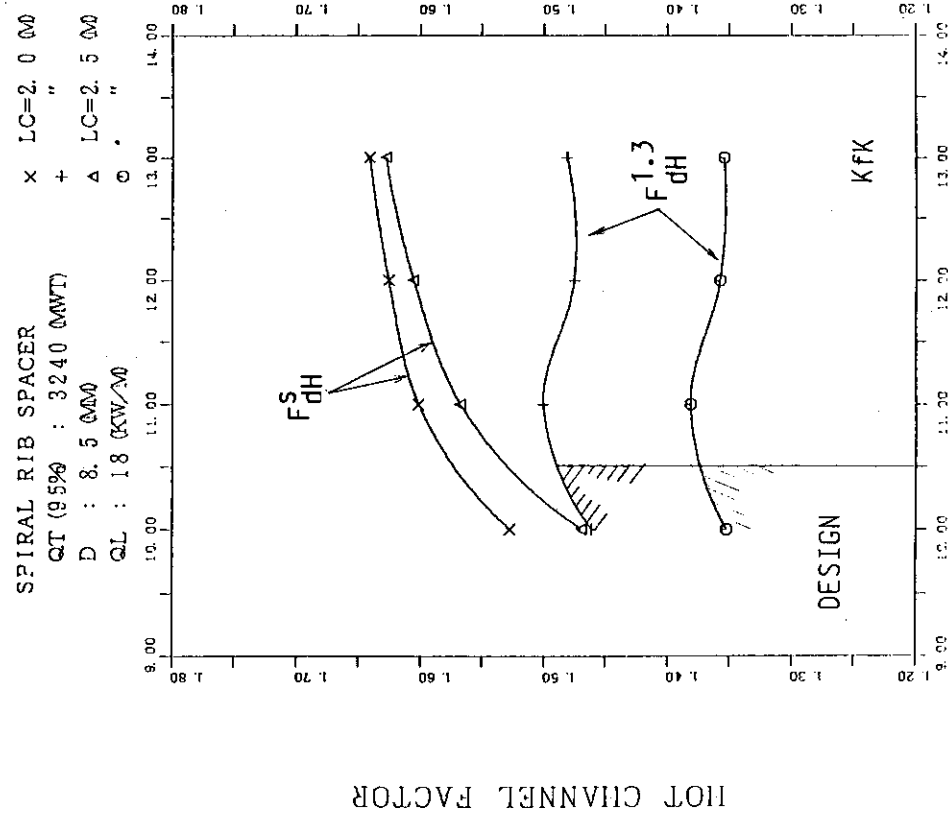
炉心高さ 1 m の増加：可能な線出力 4.7 ~ 7.6 kw/m 減少

F_{DH} が 0.01 減少： " 0.29 ~ 0.39 kw/m 増加

グリッドスペーサ型炉心では、

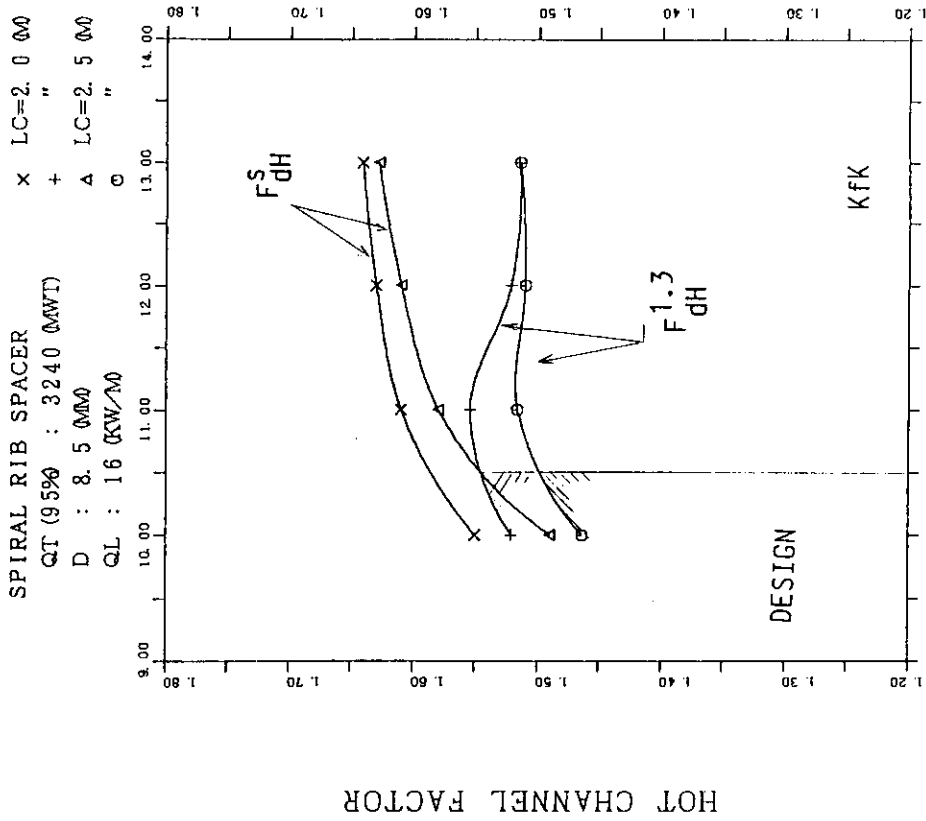
炉心高さ 1 m の増加：可能な線出力 3.2 ~ 5.3 kw/m 減少

F_{DH} が 0.01 減少： " 0.23 ~ 0.27 kw/m 増加



P (mm)

Fig. 5.2 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, D=8.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=2.2.5\text{m}$)



P (mm)

Fig. 5.1 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, D=8.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=2.2.5\text{m}$)

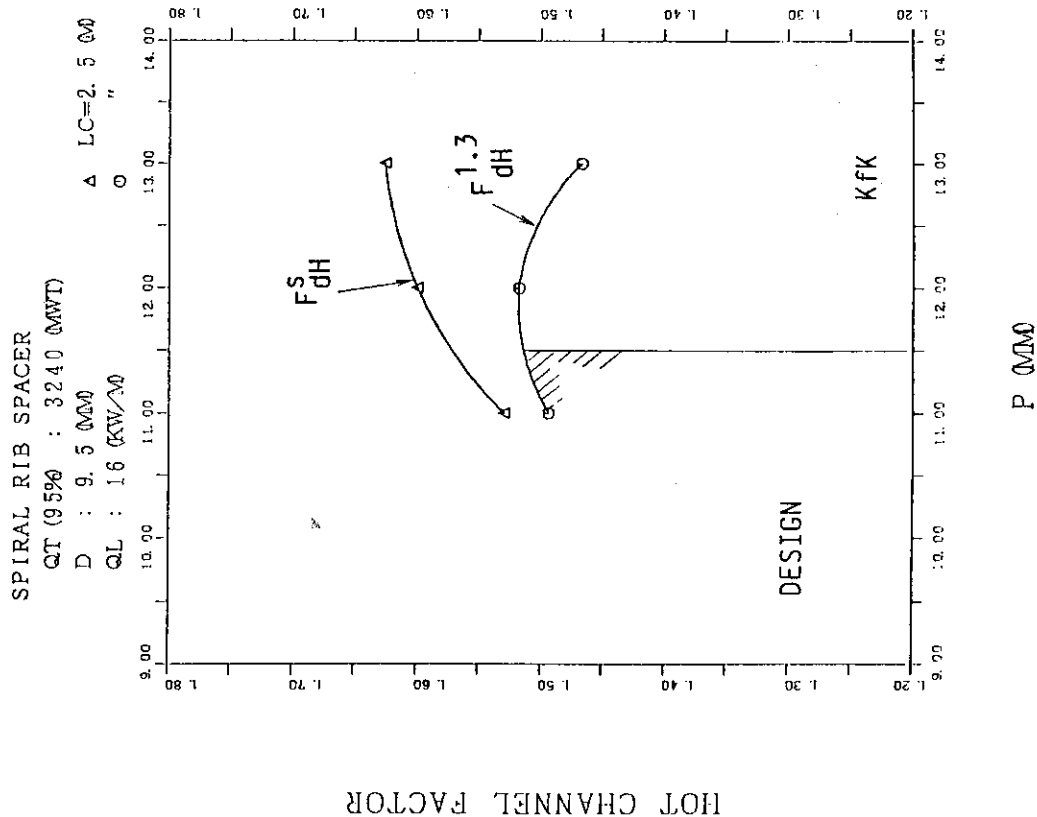


Fig.5.3 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5$ mm, $Q_L=16$ kW/m, $L_C=2$ m)

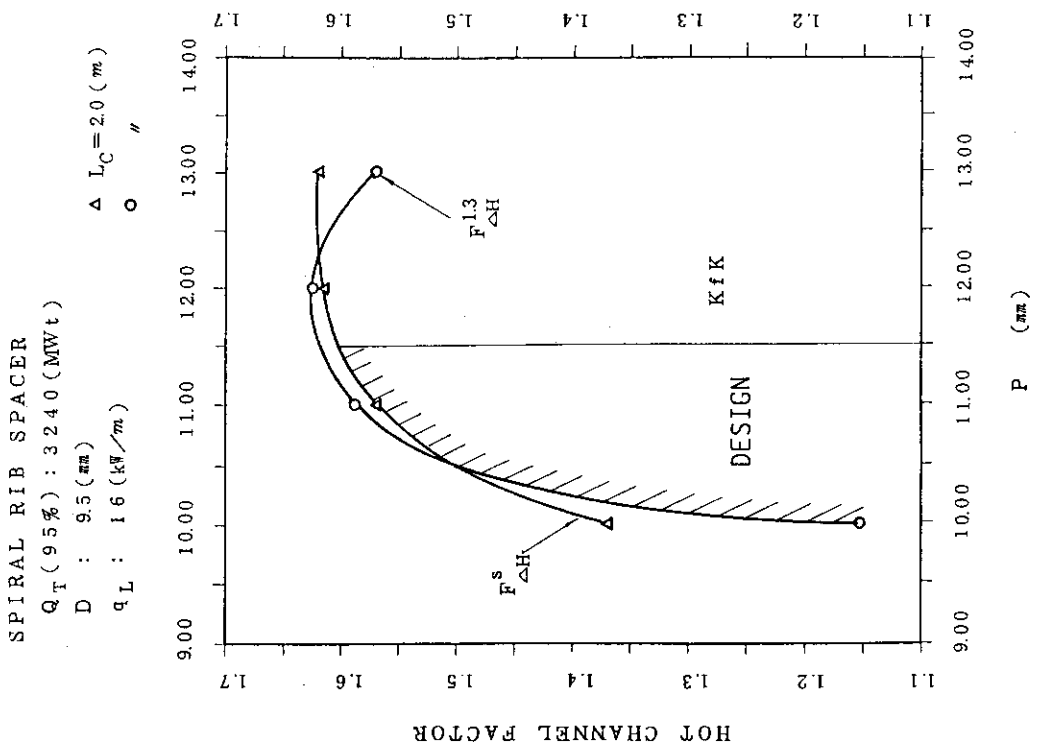


Fig.5.4 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5$ mm, $Q_L=16$ kW/m, $L_C=2.5$ m)

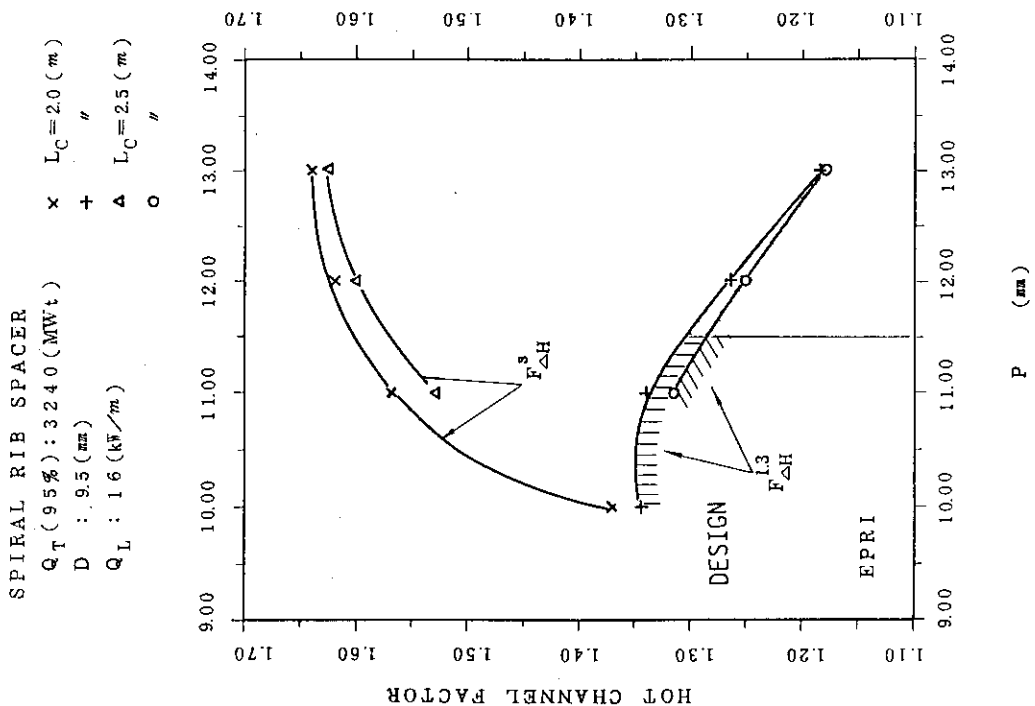


Fig.5.6 Design limit for hot channel factor (EPRI correlation)
 (spiral rib, $D=9.5$ mm, $Q_L=16$ kW/m, $L_C=2, 2.5$ m)

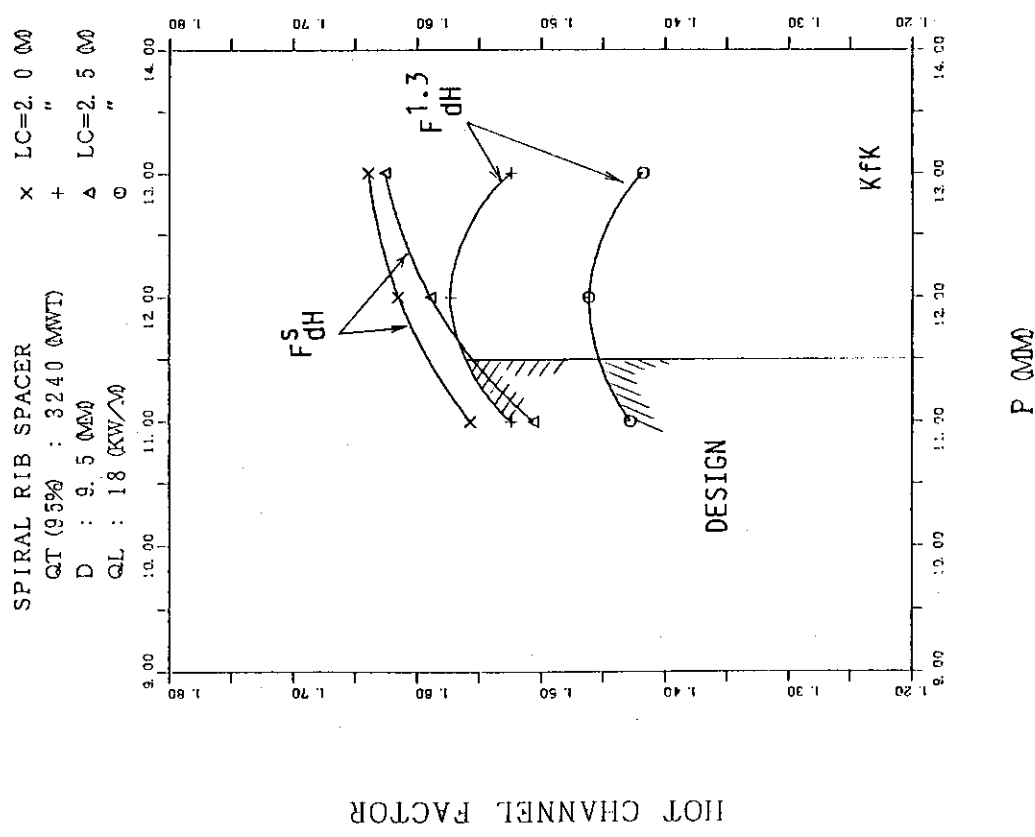


Fig.5.5 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (spiral rib, $D=9.5$ mm, $Q_L=18$ kW/m, $L_C=2, 2.5$ m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)

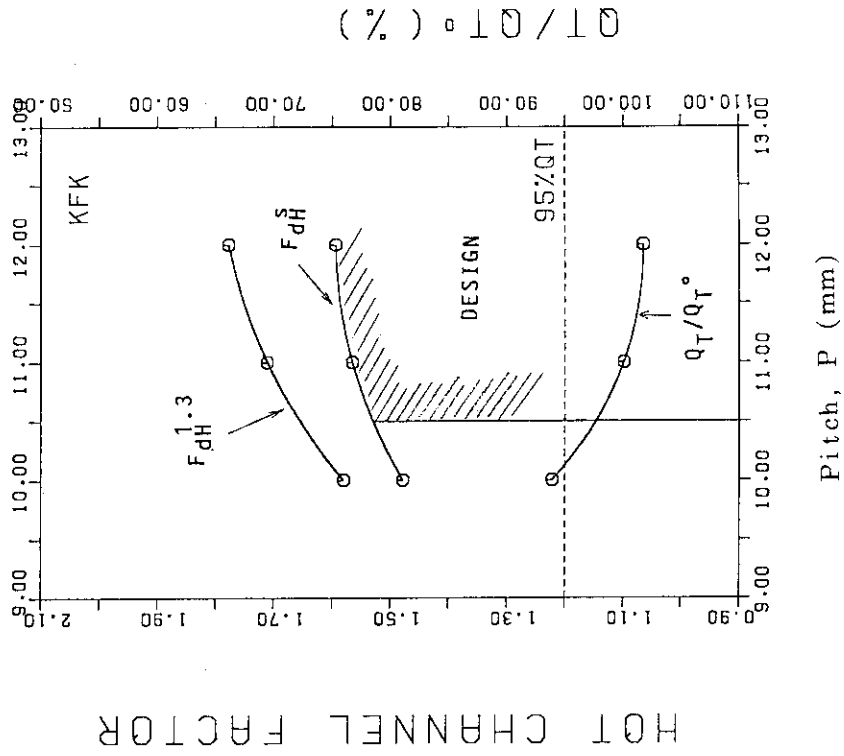


Fig.5.8 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=18kW/m$, $L_c=2m$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)

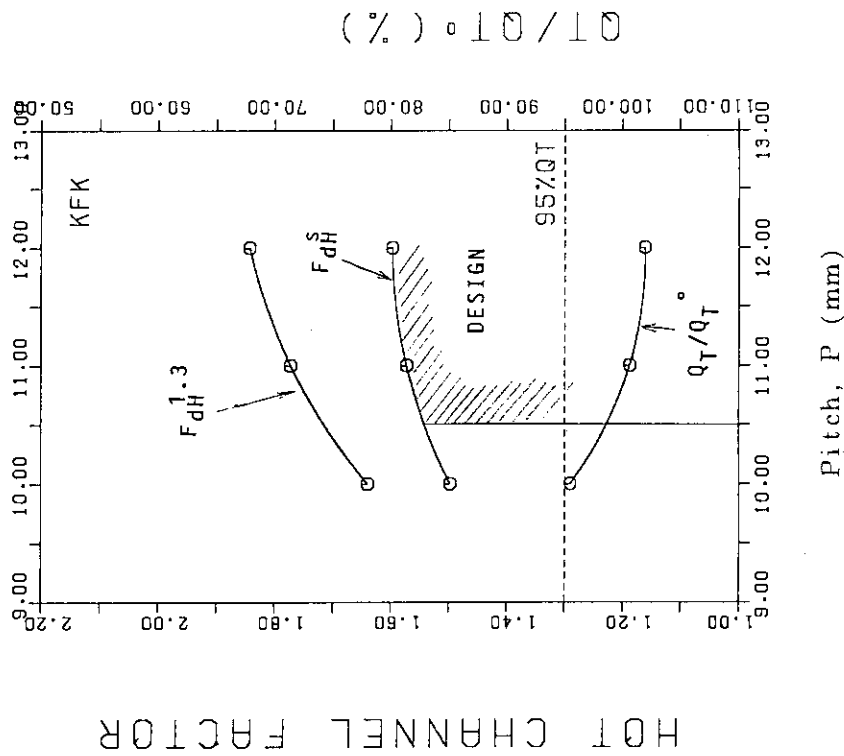


Fig.5.7 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=16kW/m$, $L_c=2m$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)

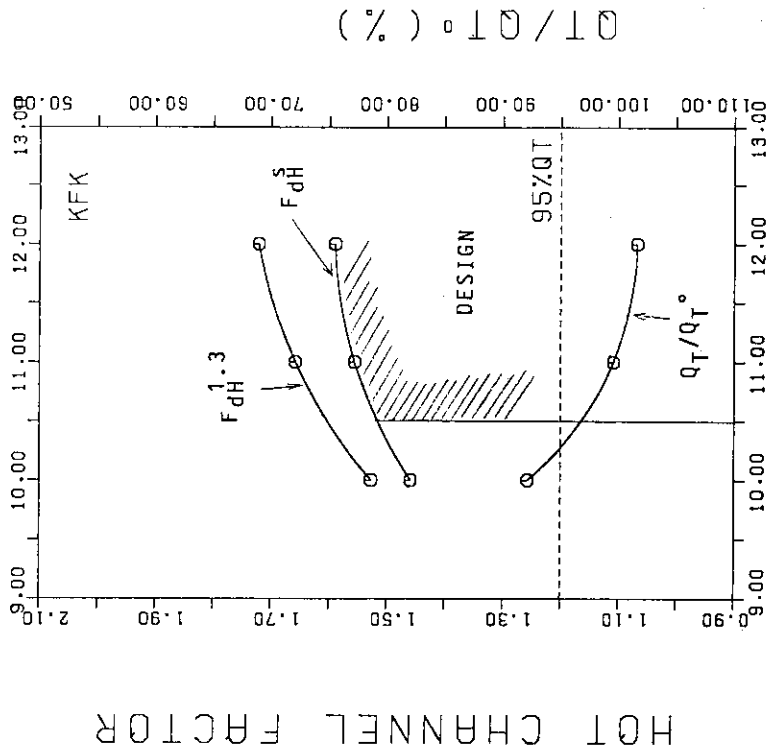


Fig.5.9 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_c=2\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)

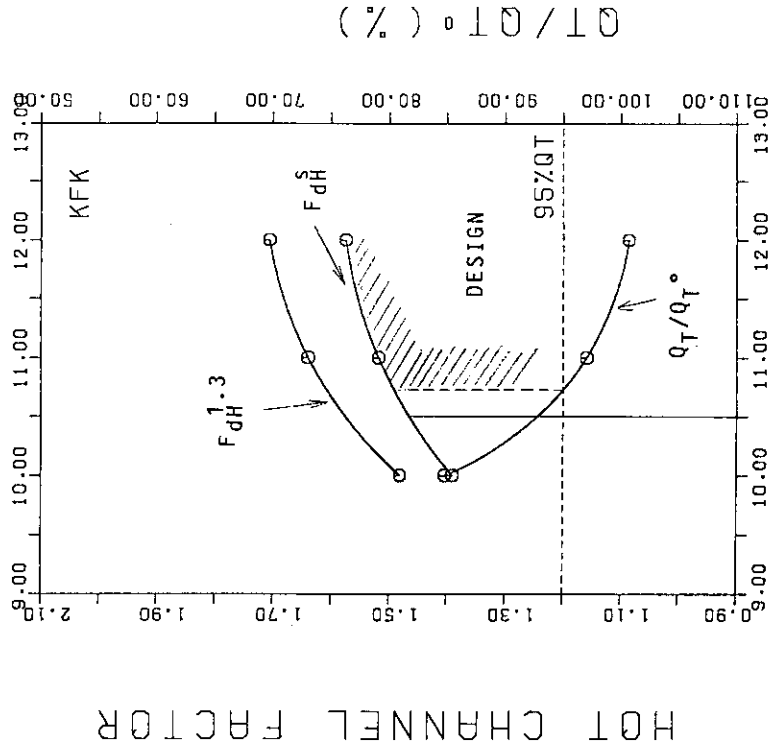
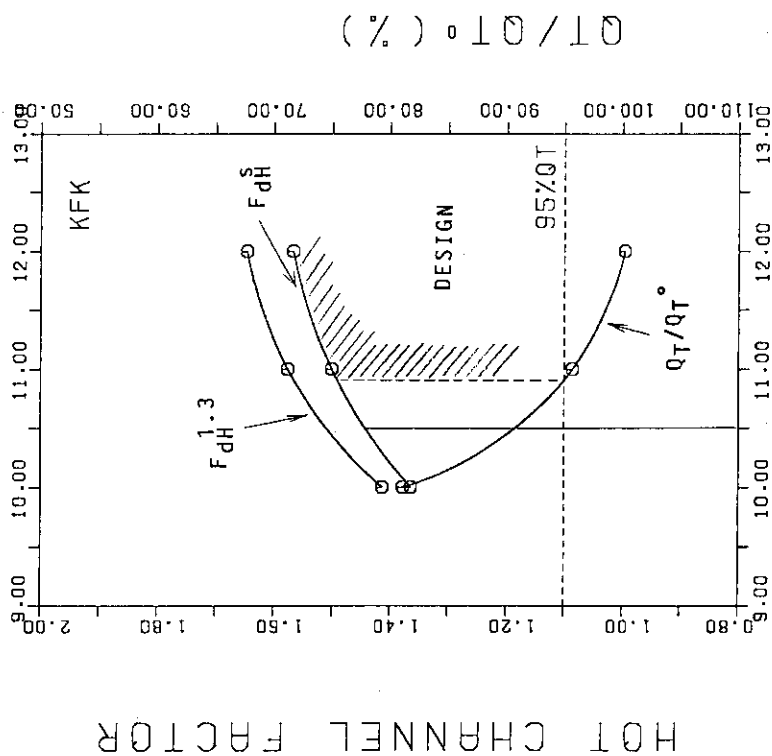


Fig.5.10 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_c=3\text{m}$)

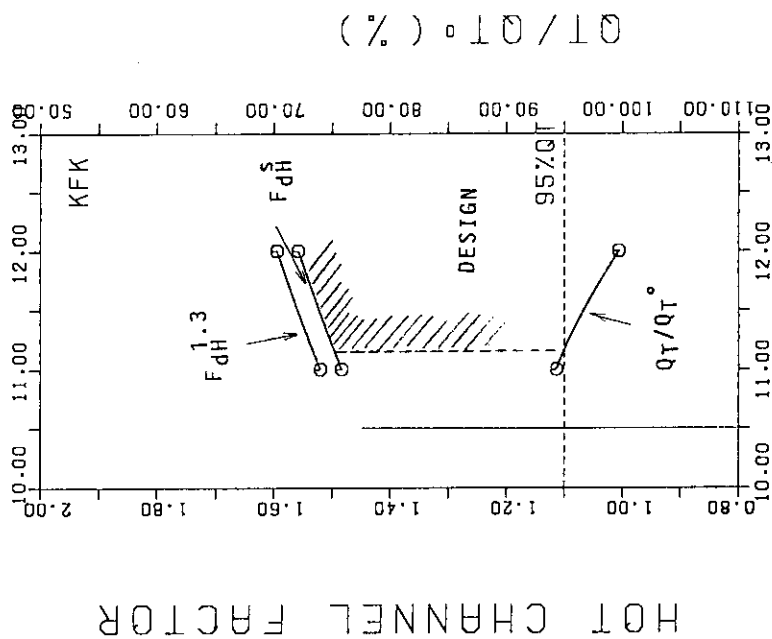
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.11 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)

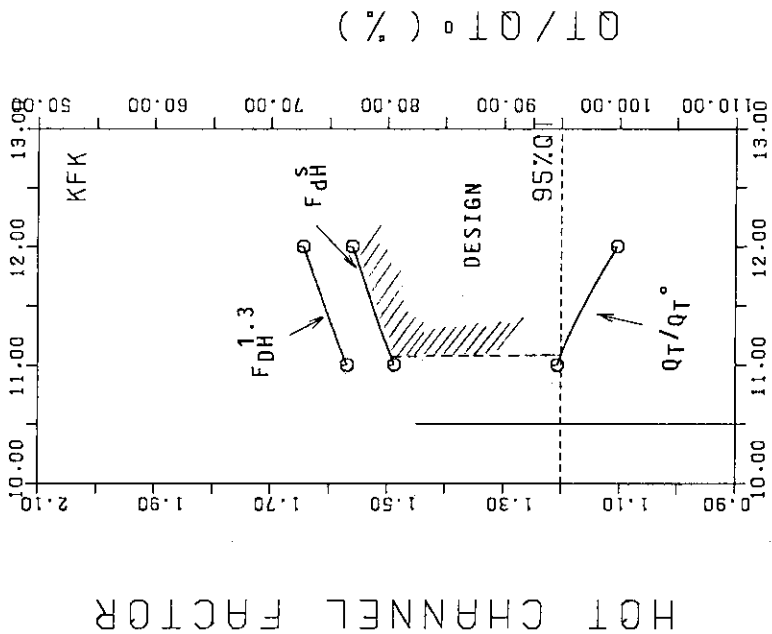
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.12 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3\text{m}$)

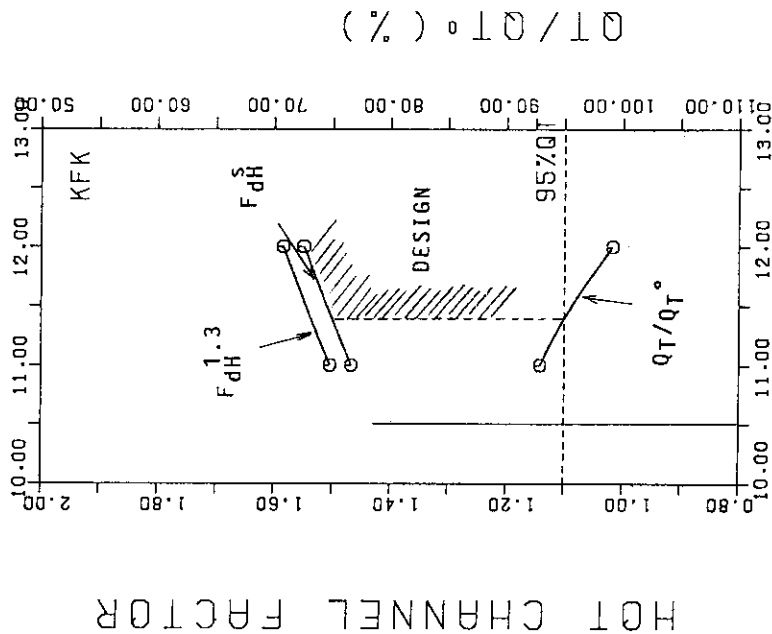
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.13 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=16kW/m$, $L_C=3.5m$)

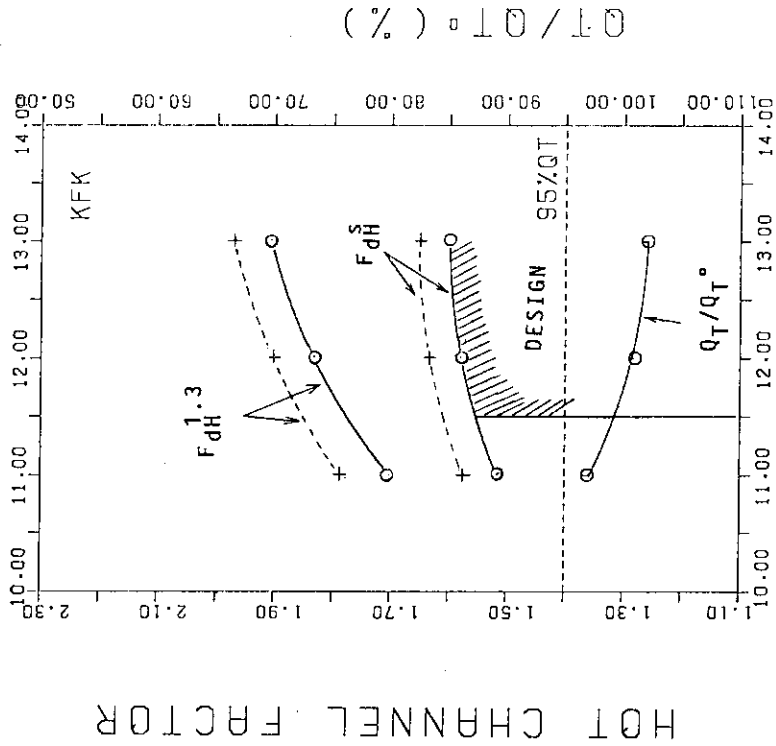
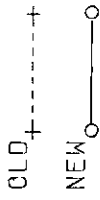
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.14 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=18kW/m$, $L_C=3.5m$)

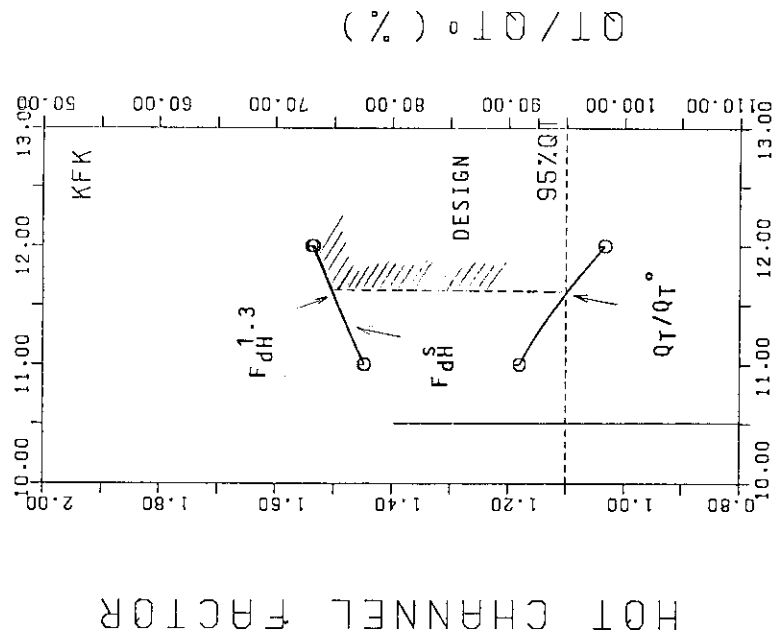
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.16 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_c=2\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 8.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.15 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=8.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_c=3.5\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)

OLD +-----+
 NEW ○-----○

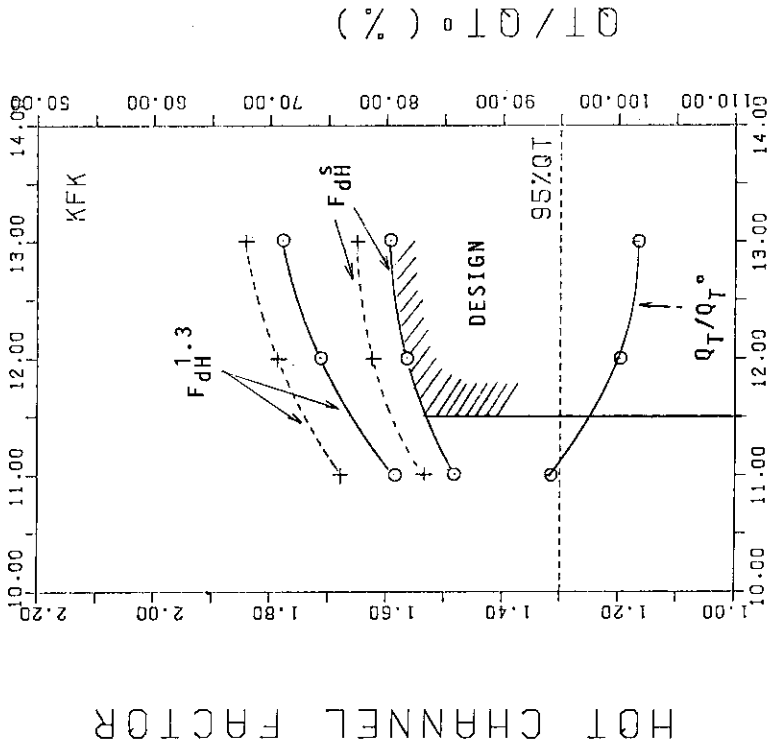


Fig.5.18 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, Q_L=20kW/m, L_c=2m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)

OLD +-----+
 NEW ○-----○

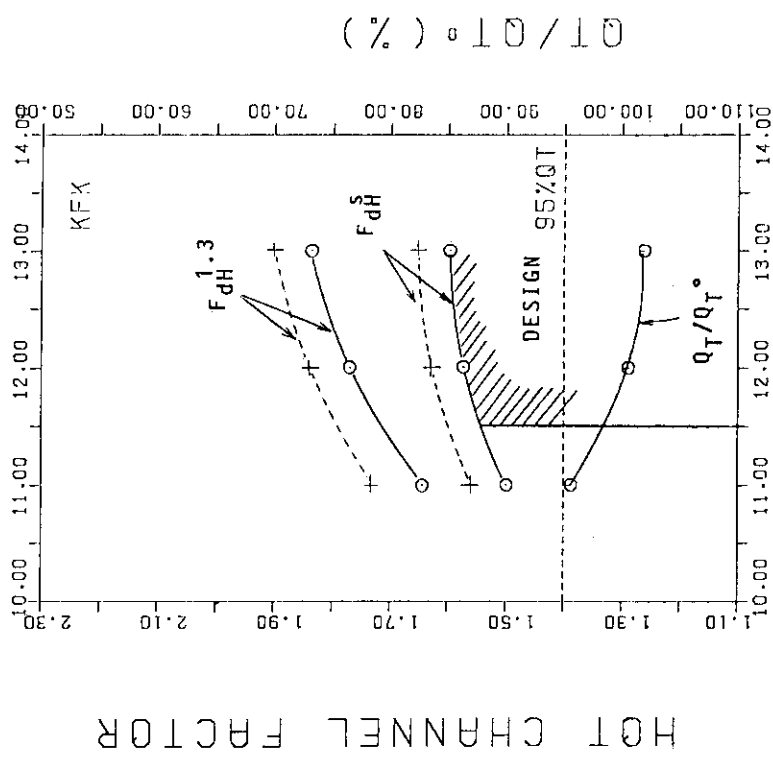
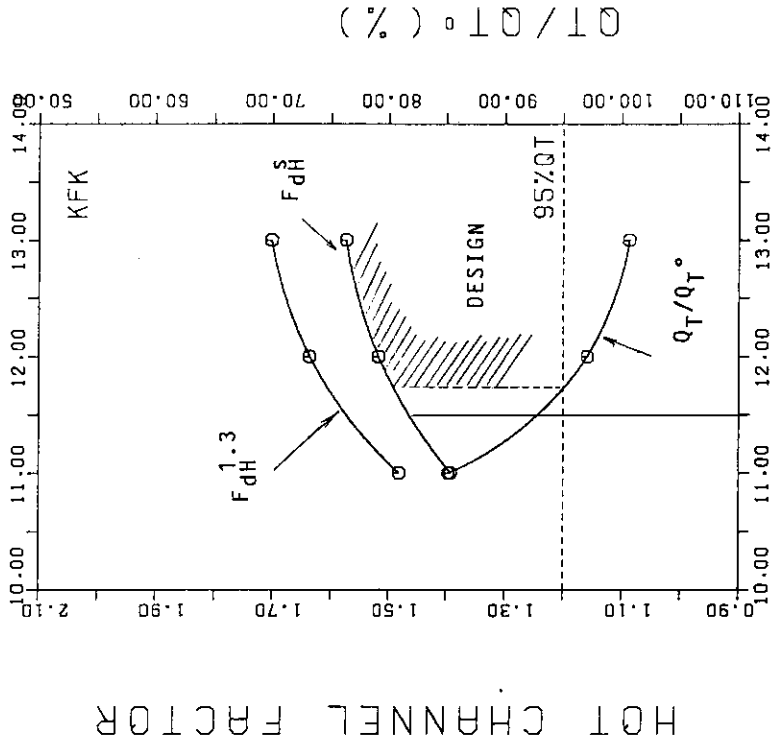


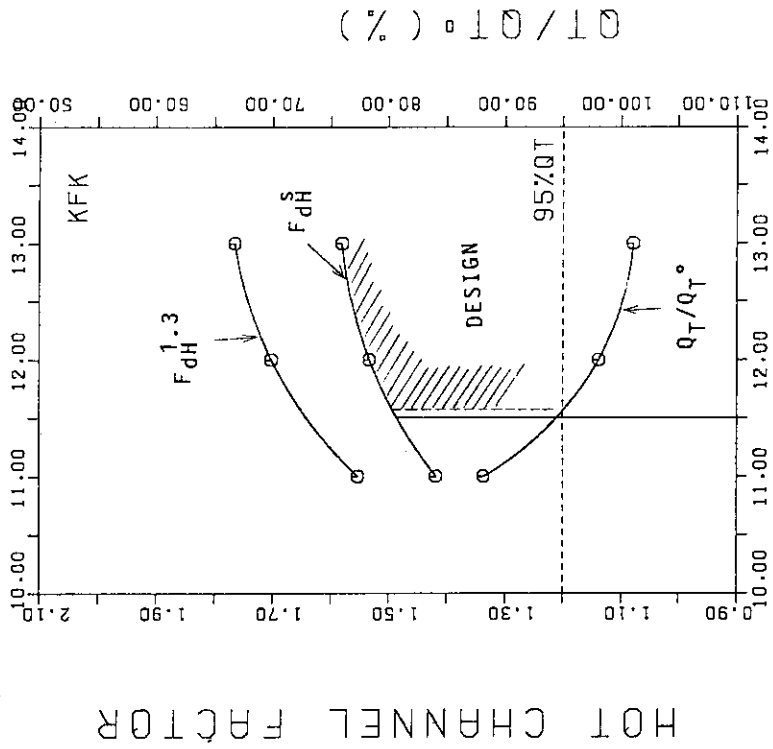
Fig.5.17 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, Q_L=18kW/m, L_c=2m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)



Pitch, P (mm)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)

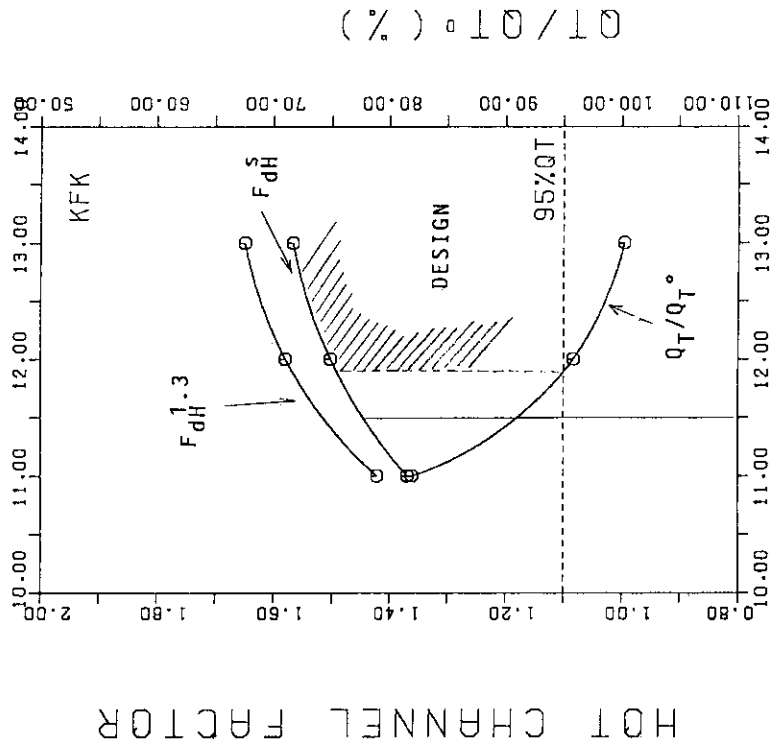


Pitch, P (mm)

Fig.5.20 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, $Q_L=18kW/m$, $L_C=3m$)

Fig.5.19 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, $Q_L=16kW/m$, $L_C=3m$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)

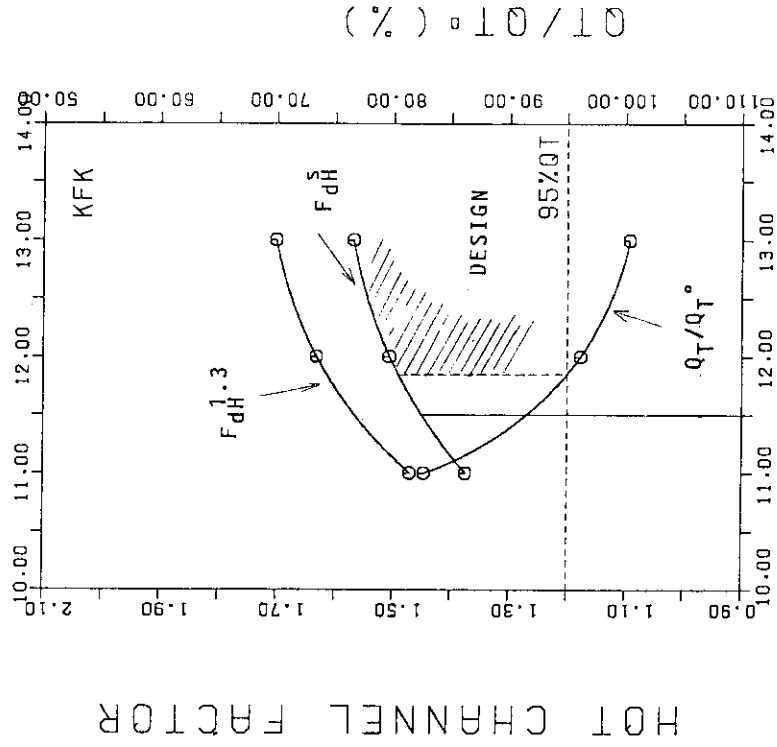


Pitch, P (mm)

Fig.5.21 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)

(grid, D=9.5mm, $Q_L=20\text{KW/m}$, $L_C=3\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.22 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)

(grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{KW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)

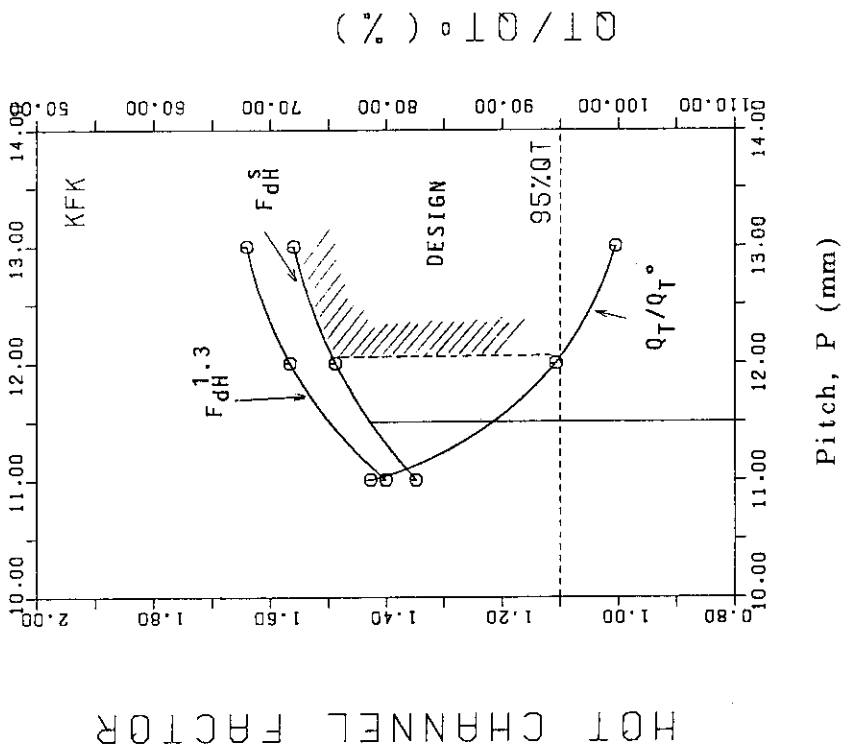


Fig.5.23 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, QL=18kW/m, Lc=3.5m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)

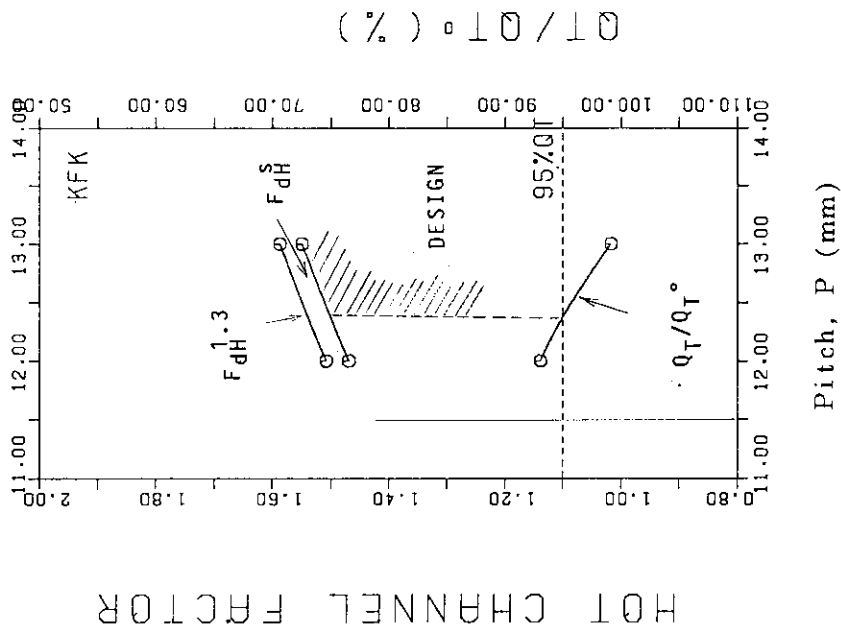


Fig.5.24 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=9.5mm, QL=20kW/m, Lc=3.5m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)

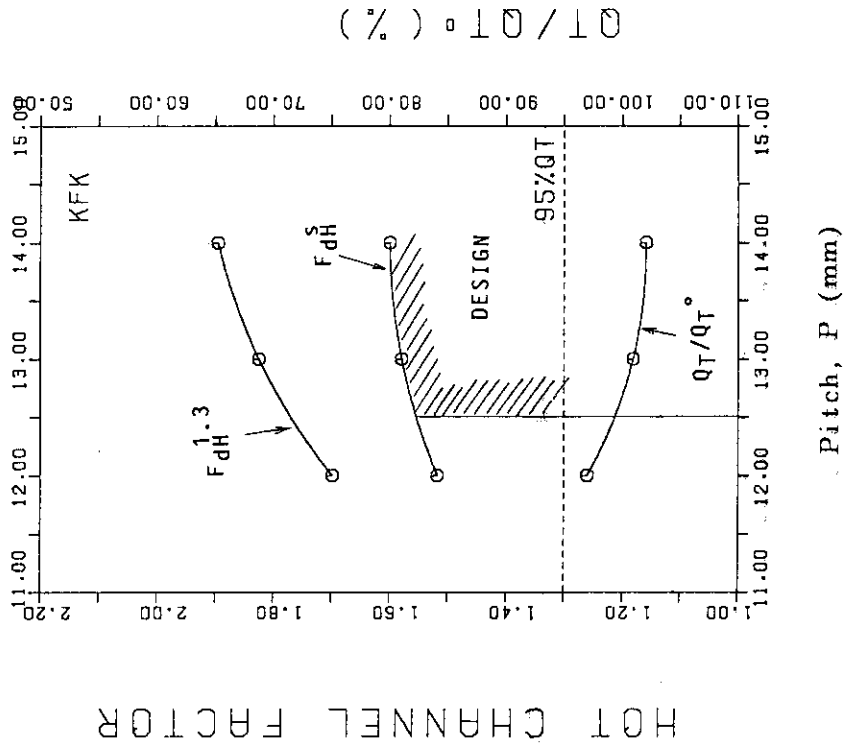


Fig.5.26 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, $Q_L=18\text{kW/m}$, $L_c=2\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)

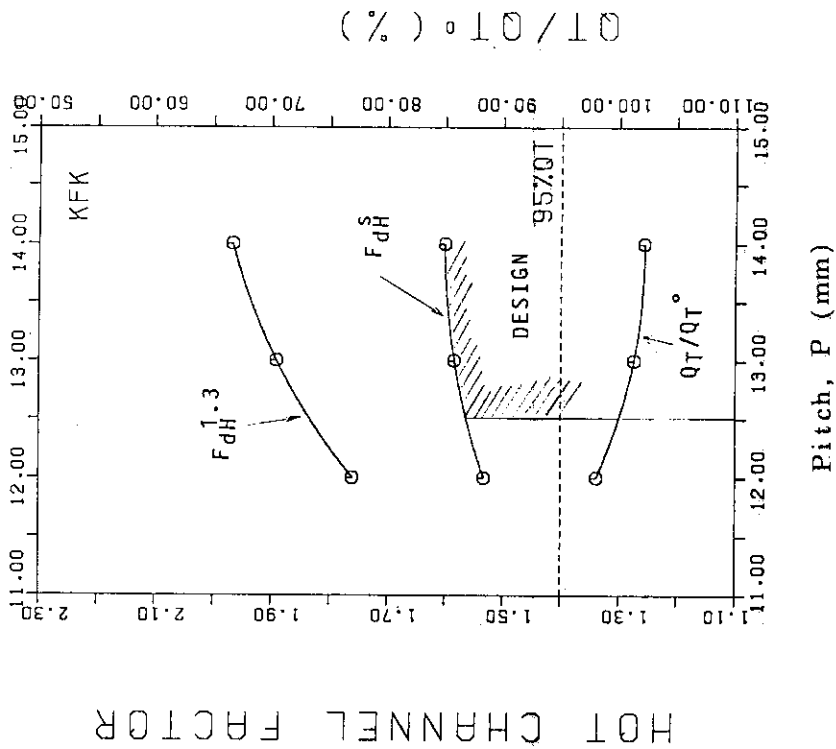
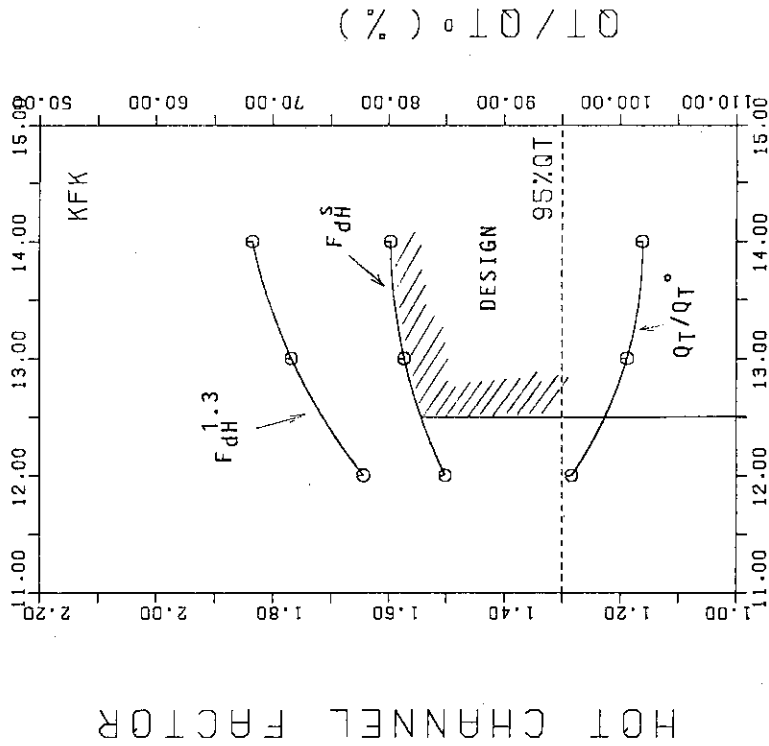


Fig.5.25 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_c=2\text{m}$)

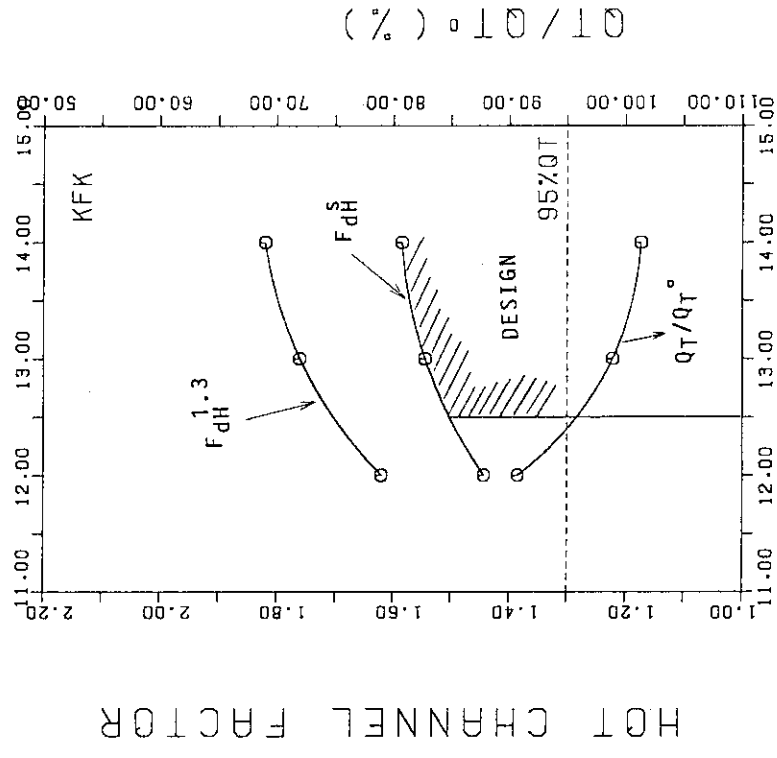
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 2.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.27 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=20kW/m, L_c=2m)

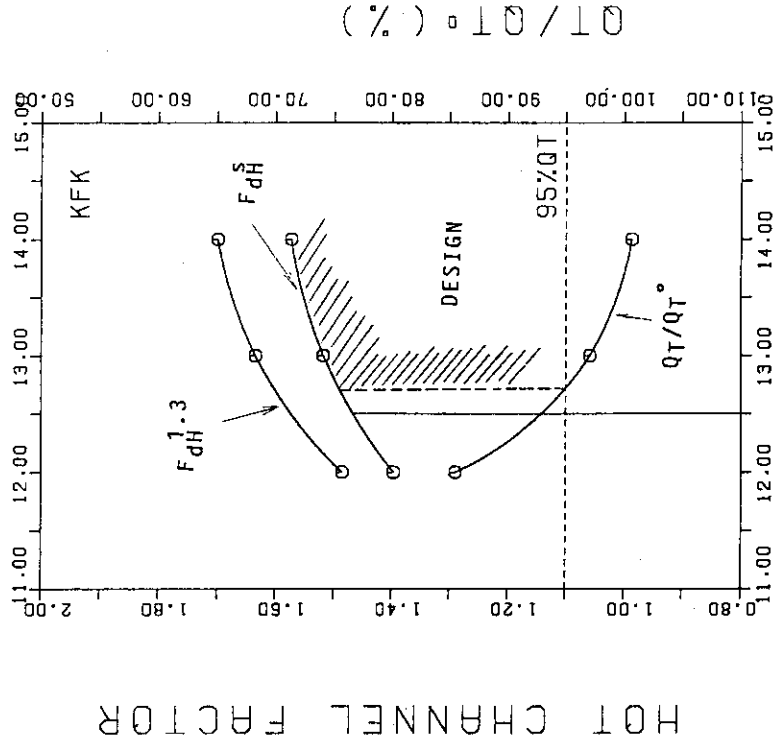
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

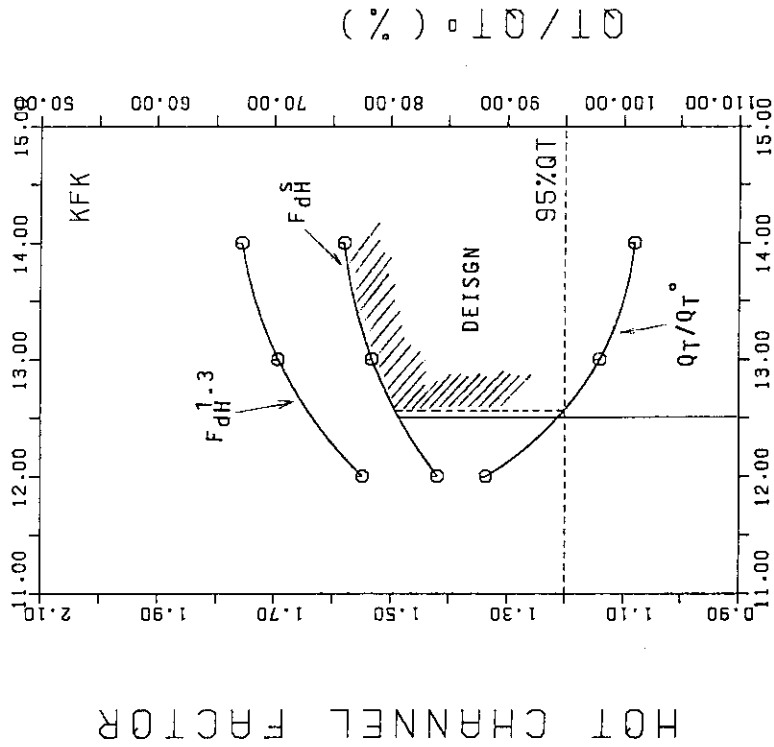
Fig.5.28 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=16kW/m, L_c=3m)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)



Pitch, P (mm)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.0 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)

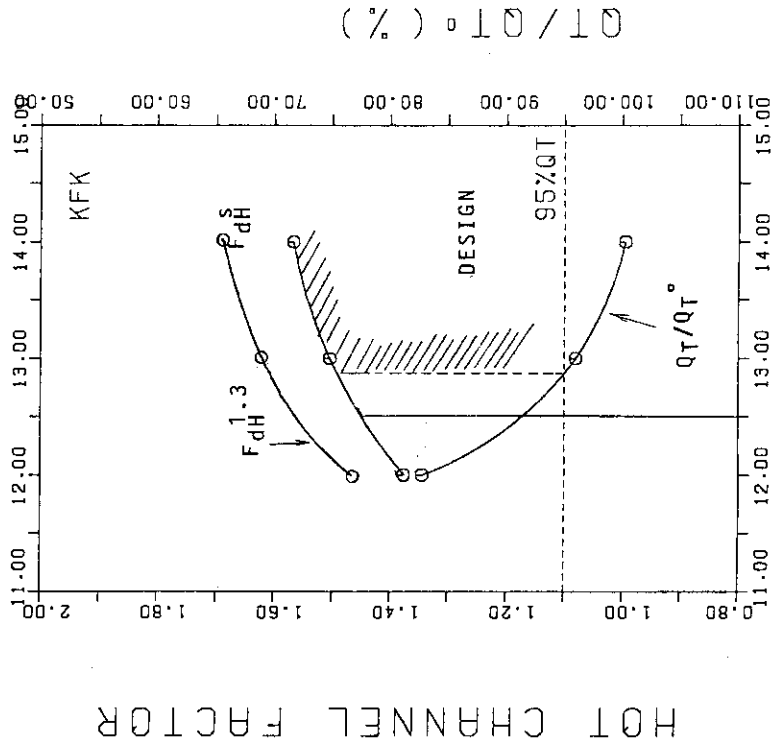


Pitch, P (mm)

Fig. 5.30 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=20kW/m, L_C=3m)

Fig. 5.29 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=18kW/m, L_C=3m)

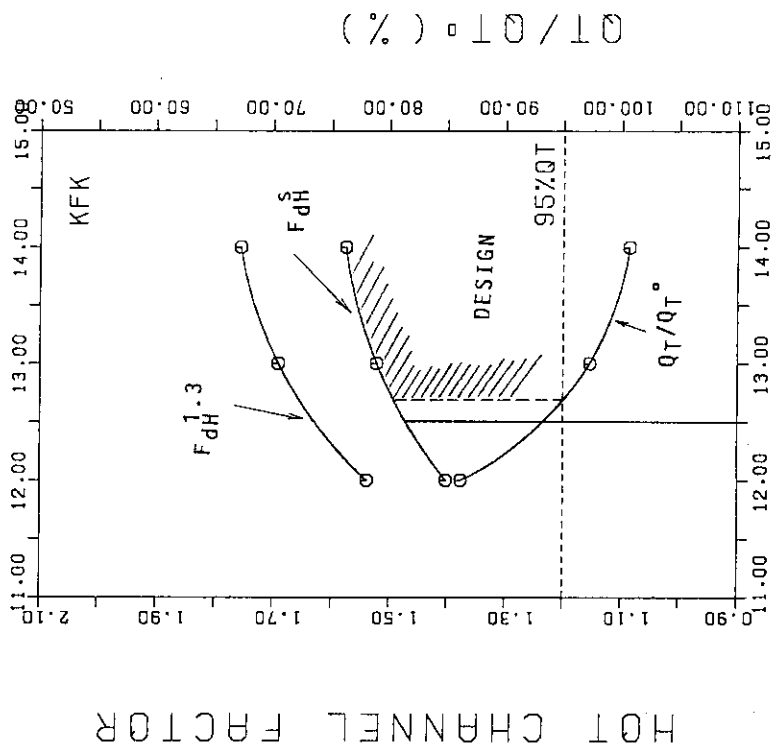
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 18 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.32 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=18kW/m, L_c=3.5m)

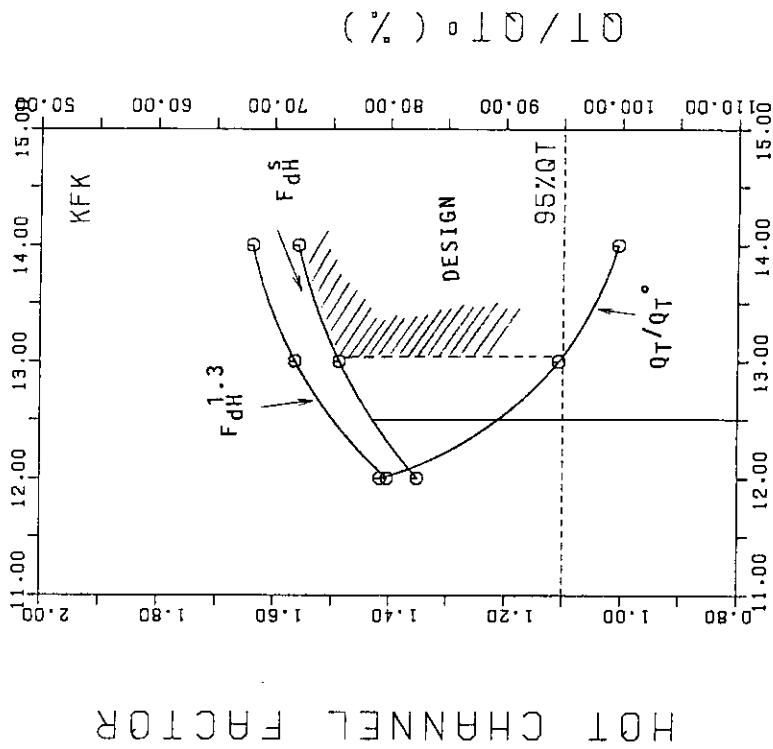
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.31 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, Q_L=16kW/m, L_c=3.5m)

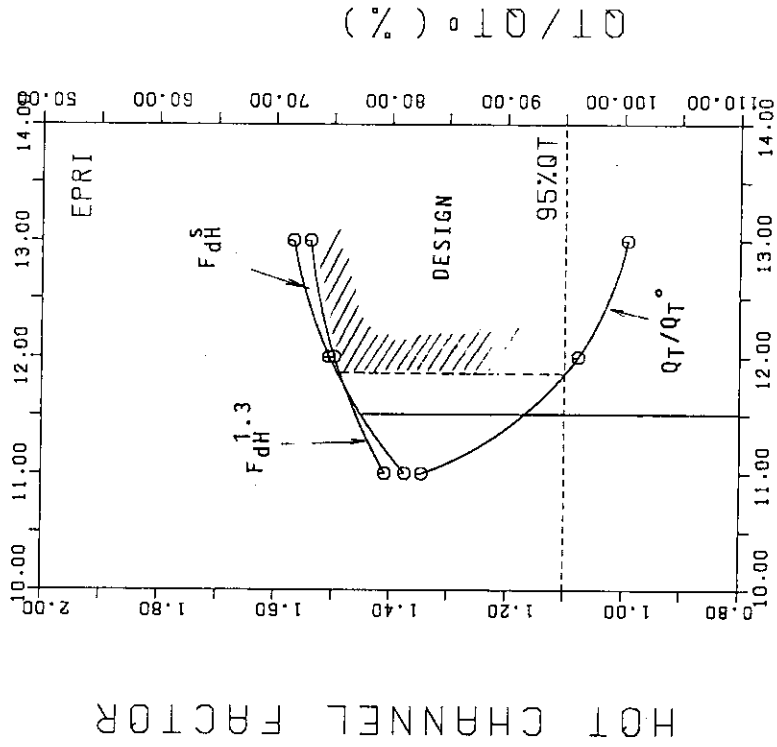
GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 10.5 (MM)
 QL : 20 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.33 Design limit for hot channel factor (KfK correlation)
 (grid, D=10.5mm, $Q_L=20\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)

GRID SPACER 112%
 QT(100%) : 3411 (MW)
 LC : 3.5 (M)
 D : 9.5 (MM)
 QL : 16 (KW/M)



Pitch, P (mm)

Fig.5.34 Design limit for hot channel factor (EPRI correlation)
 (grid, D=9.5mm, $Q_L=16\text{kW/m}$, $L_C=3.5\text{m}$)

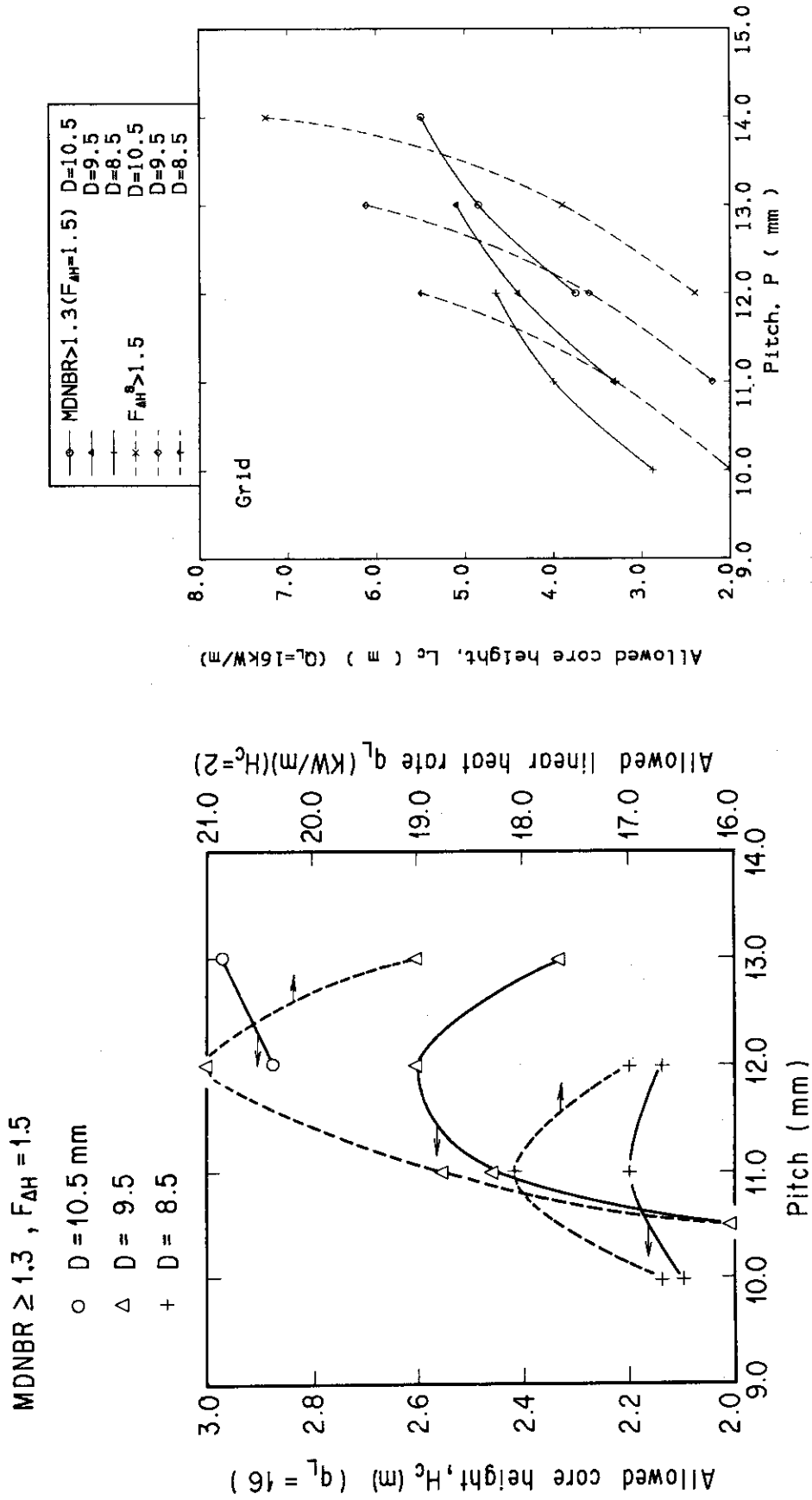


Fig.5.35 Design limit for core height and linear heat rate (spiral rib, KfK correlation)

Fig.5.36 Design limit for linear heat rate (grid, KfK correlation)

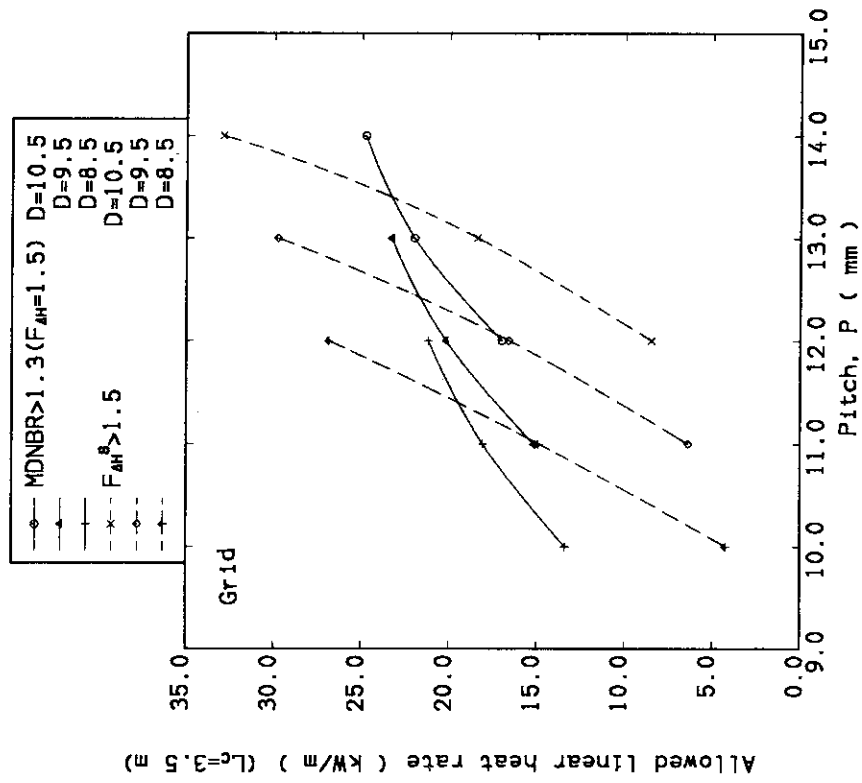


Fig.5.37 Design limit for core height (grid, KfK correlation)

6. ま と め

現用 100 万 kW_e 級 PWR プラントの炉心及びその周辺部のみを取り換えた高転換軽水炉に対して単位セルモデルに基づいて熱流力特性パラメータサーベイを行い、熱流力的に成立可能な炉心パラメータの範囲を明らかにした。また、サブチャンネルコードを用いた全炉心解析の結果と比較することにより、単位セルモデルの妥当性を検討し、安全側の評価を与えることを確認した。パラメータサーベイの結果から、核設計を進める上での制限として、ホットチャンネル因子、線出力及び炉心高さの上限値を求めた。各制限因子に関しては、①燃料最高温度は殆んどの場合制限因子とはならない、②最少 DNB はスパイラルリブスペーサ型炉心では制限因子となるが、グリッドスペーサ型炉心ではならない場合が多い、③ホットチャンネルでの飽和沸騰はグリッドスペーサ型炉心では制限因子となる、④5%以内の炉心熱出力低下は、スパイラルリブスペーサ型、グリッドスペーサ型とも、稠密で圧損の大きい場合に制限因子となる場合がある、事が明らかとなった。

本研究によって高転換軽水炉の熱流力特性の概要が明らかになったが、今後、さらに熱設計を進めるためには以下の問題を検討する必要がある。

(1) DNB 相関式

DNB 相関式として KfK と EPRI から提案されている二つの式を使用した。両者には炉心の成立を左右するほどの相違のある場合もあり、精度の高い DNB 相関式が望まれる。

(2) スパイラルリブ及びグリッドの最適化

スパイラルリブあるいはグリッドの設定によって、炉心圧損、DNB 熱流束へかなり影響があるため、その最適化を図る必要がある。これは構造強度・製作的要素とも大きく関連しているので、総合的な最適化が要求される。

(3) プレナム位置

本研究ではプレナムは上部に設定している。しかしながら、下部に設置した場合、炉心圧損が小さい、プレナム内ガス圧が低くなる等の長所が考えられるので、高転換炉心体系でも検討する必要がある。

(4) 具体的な炉心の熱流力特性の確認

集合体単位の全炉心及び集合体内のサブチャンネル解析を実施し、基本的な熱流力特性を確認する必要がある。そのためには、以下の課題の検討が必要である。

- i) 集合体間あるいは燃料ピン間の冷却材混合は熱流力特性に少なからず影響を与えるので、冷却材混合係数等の実験データ取得が重要である。
- ii) グリッド周辺部の熱流力特性の確認
- iii) 集合体間ギャップへのリーク流量はホットスポット温度上昇の要因となる。集合体ギャップ 1 mm 程度では周辺流れ効果は 1~3% という報告もみられるが、確認する必要がある。

(5) LOCA 時の解析

稠密炉心形状での過渡事象の解析モデル、解析手法の確立が必要である。

謝 辞

本報告書作成に当って、多くの有益なコメントを頂いた、安全工学第二研究室、杉本 純、岩村公道の両副主任研究員に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Uotinen V.O. et al.: "Technical Feasibility of a Pressurized Water Reactor Design with a Low-Water-Volume-Fraction Lattice," EPRI-NP-1833 (1981).
- 2) Oldekop W. et al.: Nucl. Technol., 59, 212 (1982).
- 3) Dalle Donne M. et al.: "A Parametric Thermohydraulic Study of an Advanced Pressurized Light Water Reactor with a Tight Fuel Rod Lattice," KfK 3453 (1982).
- 4) Broeders C.H.M. et al.: Nucl. Technol., 71, 82 (1985).
- 5) 秋江拓志他: "高転換軽水炉の燃焼パラメータサーベイ," JAERI-M 86-197 (1987).
- 6) Saji E. et al.: Nucl. Technol., 80, 18 (1988).
- 7) Cigarini M. et al.: ibid, 80, 107 (1988).
- 8) Hittner D. et al.: ibid, 80, 181 (1988).
- 9) 奥村啓介他: "高転換軽水炉の炉心燃焼特性(1)," JAERI-M 88-129 (1988).
- 10) Takano H. et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 24(6), 501 (1987).
- 11) Akie H. et al.: ibid, 24(8), 668 (1987).
- 12) Okumura K. et al.: ibid., 25(3), 315 (1988).
- 13) Takano H. et al.: Nucl. Technol., 80, 250 (1988).
- 14) Dalle Donne M. et al.: ibid., 71, 111 (1985).
- 15) Rehme K.: ibid., 17, 15 (1965).
- 16) Rowe D.S.: "COBRA-IIIC, A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundles Nuclear Fuel Elements," BNWL-1695 (1973).
- 17) Beyer C.E. et al.: "GAPCON-THERMAL2, A Computer Program for Calculating the Thermal Behavior of an Oxide Fuel Rod," BNWL-1898 (1975).
- 18) Baker R.B.: "Calibration of a Fuel-to-Cladding Gap Conductance Model for Fast Reactor Fuel Pins," HEDL-TME 77-86 (1977).
- 19) Roth J. et al.: "Thermal Expansion of Coprecipitated (U,Pu)O₂ Powders by X-ray Diffraction Technique," NUMEC-2389-9 (1965).
- 20) Christensen J.A.: Trans. ANS, 15, 214 (1972).
- 21) 日本機械学会蒸気表 (1988).
- 22) Stewart C.W. et al.: "VIPRE-01, A Thermal-Hydraulic Code for Reactor Cores," EPRI-NP-2511-CCM.
- 23) Stoudt R.H.: "TACO, Fuel Pin Performance Analysis-Revision 1," BAW-10087A (1977).

- 24) Tong L.S. et al.: "Thermal Analysis of Pressurized Water Reactor,"
2nd ed., American Nuclear Society, Illinois (1979).
- 25) ASME SEC. III CODE CASE N47.
- 26) FBR設計資料(未公開).
- 27) Mcfadden J.H. et al.: "RETRAN-02, A Program for Transient
Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow System,"
EPRI-NP-1850-CCM (1981).
- 28) 秋山美映: "HCPWRの熱的問題点," 第2回原子力におけるソフトウェア開発研究会報告
集, P.130, JAERI-M 86-009 (1986).
- 29) 岩村公道他: 未公開 (1988).

付録1 GAPCON-THERMAL2-HCコードの燃料温度解析法

燃料温度の解析には、寿命中の燃料ピンの照射挙動を追跡することができる GAPCON-THERMAL2コード¹⁷⁾を用いて行った。本計算では以下の現象を考慮している。

- ・ギップコンダクタンスの変化
- ・燃料の再組織化
- ・核分裂生成ガスの生成と放出
- ・ペレットの熱膨張，弾性変形等

ここでは、本計算に用いた物性値及びモデルを簡単に述べる。

(1) ペレットの物性値

熱伝導率

混合酸化物燃料ペレットの熱伝導率としては以下に示す Brancheria の式¹⁸⁾を使用する。

$$K_F = D_1 \left[\frac{1}{2.88 + 0.0252 Ta} + (5.83 \times 10^{-13}) Ta^3 \right]$$

ここで、

$$D_1 = \begin{cases} 21 \rho^{-1} - 10 \rho^2 & (0.85 \leq \rho \leq 0.95) \\ \frac{3\rho - 1}{2} & (0.95 \leq \rho \leq 1.00) \end{cases}$$

あるいは、

$$D_1 = \begin{cases} 1 - 1.5 P_f & (0.0 \leq P_f \leq 0.05) \\ 1 - P_f - 10 P_f^2 & (0.05 \leq P_f \leq 0.15) \end{cases}$$

P_f : 有孔率

ρ : 理論密度に対する相対密度

Ta : 温度 (°K)

K_F : 熱伝導率 (W/cm・°K)

Fig. A 1.1 に熱伝導率のいくつかの評価式を比較している。本図で、Brancheria の式は、S I E X M I で示されているが、他の式と比較して重要な高温域で安全側の値を与えている。

熱膨張率

Roth と Haltzman¹⁹⁾によって与えられたデータを使用する。

$$\alpha = [9.45 \exp(-0.0034 C) + (0.0012 + 8.66 \times 10^{-5} C) T] \times 10^{-6}$$

ここで,

- α : 線膨張率 (in/in $^{\circ}$ C)
 C : PuO₂の含有率 (%)
 T : 温度 (°C)

スウェリング

燃料のスウェリングによる膨張は Geithoff 等の関係式¹⁷⁾を使用する。

$$\Delta V_B = (h_f \cdot V_f \cdot f + h_c V_c) \frac{BU}{10,000} - (1-f)(0.8 V_h + 0.5 V_v + 0.3 V_e)$$

ここで, ΔV_B : 燃焼度 (核分裂生成によるスウェリングによる体積変化)

- f : 理論密度に対する相対密度
 h_f : 燃料棒全体についてのスウェリング率で 10,000 MWd/MTM 当りの $\Delta V/V$ を 1.6% とする。
 V_f : 燃料の単位長さ当りの体積
 h_c : 1300 ~ 1700 °C の領域にある燃料の付加的スウェリングで 10,000 MWd/MTM 当りの $\Delta V/V$ を 0.4% と仮定する。
 V_c : 1300 °C から 1700 °C の間にある燃料の体積
 Bu : 燃焼度 (MWd/MTM)
 V_h : 1700 °C 以上の燃料の体積
 V_v : 1300 °C 以下の燃料の体積

体積増加の 1/3 が軸方向に向かうものであると仮定するとスウェリングによる半径増加 Δr_B は,

$$\Delta r_B = \frac{\frac{2}{3} \Delta V_B}{2 \pi r}$$

燃料の再組織化

燃料の再組織化はある温度で起こり, その温度は出力状態におかれた時間に依存すると仮定する。コードでは Christesen の関係式²⁰⁾

$$\frac{1}{T_{RS}} = 1.367 \times 10^{-5} \log_{10}(t) + 4.8 \times 10^{-4}$$

を用いて, 再組織化の起こる温度 (T_{RS} (°K)) を決めている。上式は t は出力状態におかれた時間 (hr) である。

再組織化を起こした燃料の半径と中心空孔の半径は, 上記の再組織化温度と再組織化した燃料の密度を基に計算される。燃料密度を以下の通り仮定する。

初期組織	93 %TD
等軸晶	95 %TD (1350°C~1700°C)
柱状晶	96.5 %TD (1700°C以上)

燃料温度分布計算は再組織化した燃料ピンに対して行なわれる。

(2) SUS 304 の物性値

熱伝導率, 引張り強度等は ASME Sec III に準拠する。その他の物性値は GAPCON-THERMAL2 コードに内蔵されているデータを使用する。

(3) 水の物性値

日本機械学会蒸気表²¹⁾に準拠する。近似式は, 文献22に与えられているものを使用する。

(4) ギャップコンダクタンス

ペレットと被覆管の間のギャップコンダクタンスの計算には, GAPCON-THERMAL2 に組み込まれている計算式を用いる。

(5) FPガス放出率

TACO²³⁾で使用されている次式によりFPガス放出率を評価した。

$$F(Bu, T) = f(T) + \frac{1 - \exp[-0.436 \times 10^{-4} (Bu - 20,000)]}{1 + \frac{0.665}{f(T)} \exp[-1.107 \times 10^{-4} (Bu - 20,000)]} [1 - f(T)]$$

ここで, $F(Bu, T)$: 燃焼度 Bu (MWd/mtU), 温度 T (°C) におけるFPガス放出率は

$$f(T) = -0.323 + 0.4077 \times 10^{-3} T \quad (f(T) \geq 0.01)$$

Fig.A1.2 にいくつかの線出力密度に対する放出率を示した。上式は図中破線で示されている。

(6) 熱伝達率

单相流の熱伝達率は以下の Dittus-Boelter の式²⁴⁾により求める。

$$\frac{h D_e}{\lambda} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

ここで, h : 熱伝達率 (Btu/hr · ft² · °F)

D_e : 水力等価直径 (ft)

λ : 流体の熱伝導率 (Btu/hr · ft · °F)

Re : 流体のレイノルズ数

Pr : 流体のプラントル数

また, 沸騰開始後の被覆管表面温度は次の Thom の式²⁴⁾を用いて評価する。

$$\Delta T_s = \{ 0.072 \exp(-P/1260) \} (q'')^{0.5}$$

ここで, ΔT_s : $T_w - T_s$ (°F)

P : 冷却材圧力 (psi)

T_w, T_s : 被覆管表面温度と冷却材飽和温度 (°F)

なお、沸騰開始点は Bergles-Rohsenow の式²⁴⁾ :

$$q_j'' = 15.6 p^{1.156} (\Delta T_s)^{2.80/p^{0.0234}}$$

を用いて求める。上式で q_j'' が沸騰開始熱流束 (Btu/hr · ft²) である。

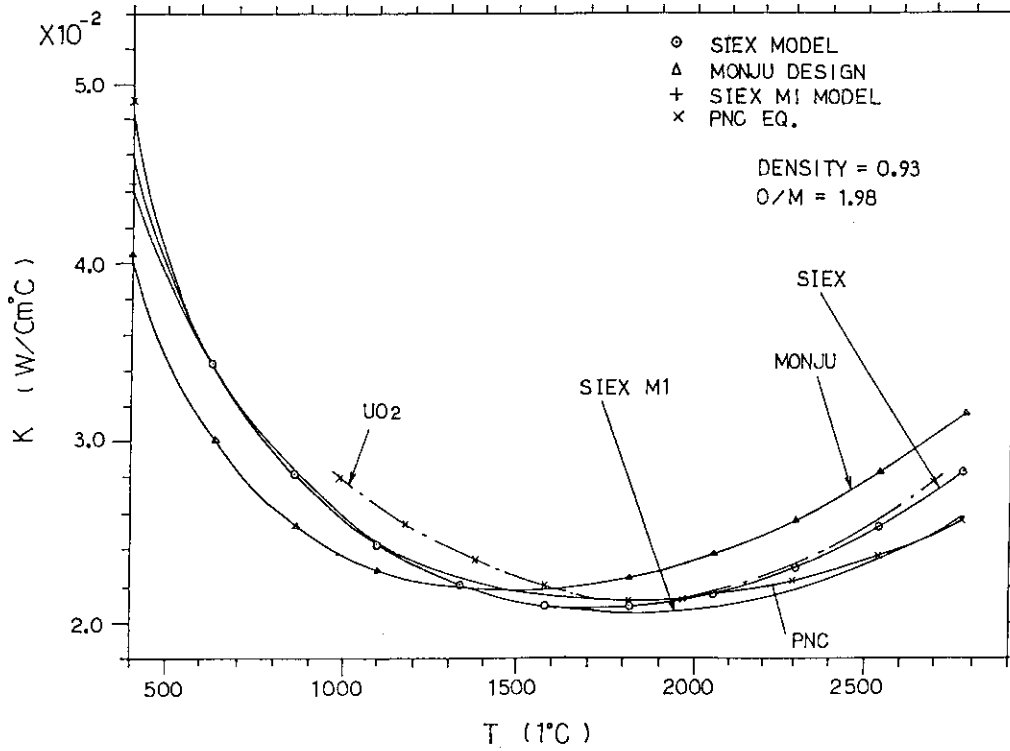


Fig.A1.1 Comparison of fuel pellet thermal conductivity

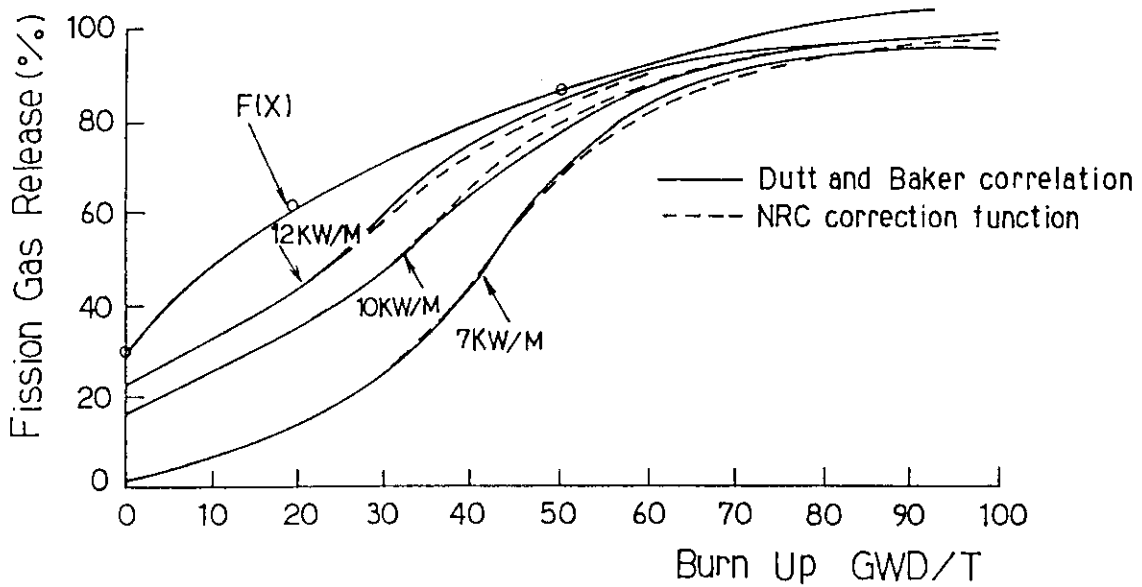


Fig.A1.2 Comparison of FP gas release models

付録2 COBRA-HCLWRコード

(1) 概要

COBRA-HCLWRは、高転換軽水炉の熱流力特性、主に定常状態の熱流力特性を解析するために、COBRA-ⅢCコード¹⁶⁾を基に開発したものである。

COBRAコードは、基本的には、質量保存式、軸方向運動量保存式、横方向運動量保存式及びエネルギー保存式を連立し、有限差分法を用いて解を得るものである。その手法は、炉心内をいわゆるサブチャンネルと呼ばれる多くのチャンネルに分割し、各チャンネルを一次元的に結合し、各々の熱流力バランスを求めるサブチャンネル解析である。従って、本計算においては、流路面積とぬれ縁長さが重要であり、正確なチャンネル形状は必要ではない。このようなサブチャンネル解析はロッドバンドル型の炉心熱流力特性解析において一般的に用いられている。

ここでは、COBRA-ⅢCの機能を保持しつつ、主に以下に示す項目の改良・修正を行い高転換軽水炉系に対しても適用可能とした。

- ① 臨界熱流束を与える相関式
- ② 炉心圧損評価
- ③ 水の物性値
- ④ 一次系ポンプ特性

本コードの使用法は付録4に示した。

(2) COBRA-ⅢC

臨界熱流束を与える相関式 (CHF, DNB相関式)

従来の軽水炉ロッドバンドルに対しては、多くのCHF相関式で提案されており、COBRA-ⅢCコードにも二つの相関式(W-3及びB&W2)¹⁶⁾が内蔵されている。高転換軽水炉に対しては、第2.2.2(3)節に示した二つの相関式が知られている。一つはM. Dalle Donne等が提案しているKfK相関式¹⁴⁾で、もう一つは、V. Uotinen等によるB&W-VPI&SU (EPRI)相関式¹⁾である。これら二つの相関式がCOBRA/HCLWRに組込まれている(サブルーチンCHFより呼ばれるファンクションCHFKFKとCHFEPRにより結び付けられている)。

炉心圧損評価

COBRA-ⅢCには、通常の摩擦圧損評価式 $f = a Re^b + C$ が内蔵されている。また、スパーサとしてワイヤーラップ型とグリッドスパーサ型の二種類が用意されている。ここでは、新しく、高転換軽水炉での使用が考えられているスパイラルリブ用に、第2.2.1(3)節に示したRehmeの評価式¹⁵⁾を組込んだ。但し、各軸方向ノードにおける物性値を用いて圧損評価を行う点がGAPCON-TERMAL2-HCとは異なっている。

水の物性値

従来のCOBRA-ⅢCコードは、水の物性値として飽和水の値を用いているが、COBRA-HCLWRでは、圧力及び温度に依存した値を使用できるように修正した。水の物性値として

は RETRAN-02 で用いている内挿式²⁷⁾を組込んだ。これは1964年の ASME 蒸気表に準拠したものである。但し、RETRAN-02 の蒸気表内挿式には温度からエンタルピーを算式する式がないので、この部分には川崎重工²⁸⁾所有の蒸気表を組込んでいる。これらの蒸気表から得られる値を、入口条件 ($T_{in} = 286.6^{\circ}\text{C}$, $P = 159 \text{ kg/cm}^2$) 及び $P = 159 \text{ kg/cm}^2$ 下での飽和状態において比較してみると以下ようになる。ここで飽和水の物性値は、1967年国際蒸気表を基礎にした1980年の日本機会学会蒸気表²¹⁾から取っている。

◦ 入口条件の相違 ($T_{in} = 286.6^{\circ}\text{C}$, 547.9°F)

	飽和水からの内挿値 (国際蒸気表)	KH I 蒸気表	RETRAN-02 蒸気表
入口温度	547.9 °F	547.9	549.8
	↓	↓	↑
入口エンタルピー	546.7 Btu/lb	543.4	546.7

◦ $P = 159 \text{ kg/cm}^2$ の飽和状態

	飽和水からの内挿値 (国際蒸気表)	KH I 蒸気表	RETRAN-02 蒸気表
飽和温度	653.4 °F	653.4	655.2
飽和エンタルピー	702.7 Btu/lb	703.8	703.3

従って、この程度の相違のあることを念頭において以後の解析を行う必要がある。

一次系ポンプ特性

第2.2節で述べた GAPCON-THERMAL2-HC コードと同様に、一次系冷却材ポンプの Q-H 特性から炉心冷却材流量を評価する機能を追加した。但し、ポンプ特性は $H_T = A \cdot Q + B$ の形に書けるものとする。COBRA-HCLWR では、最大圧損を生じるチャンネルの圧損を用いて一次系冷却材流量を計算する。この時、チャンネルでの圧損には reversible な加速損失と重力による損失を含んでいるために、いくぶん全圧損を大きく評価しており、その結果として、一次系流量を過小評価している。各チャンネルの入口流量は流路面積に応じて配分する。また、入口エンタルピー及び入口温度は流量と発熱量から計算し、各チャンネルの入口エンタルピー及び温度は等しいとする。

ランプ化サブチャンネルモデル

以下の二つの事由を考慮して、COBRA-HCLWR コードによる計算にランプ化サブチャンネルモデルを採用した。

- i) 従来の COBRA-III C コードで取り扱っているサブチャンネルモデルを全炉心体系に適用すると、数千から数万のサブチャンネルが必要となり膨大な計算時間と記憶容量を要し現実的でない。

ii) 全炉心体系での熱流特性では個々のサブチャンネル特性よりも、もっと大きな単位、例えば燃料アセンブリ単位での特性に注目することが重要であり、サブチャンネル解析は特定のホットアセンブリに対して行うだけで十分である。従って、大きな単位の中では、個々のサブチャンネルは平均的な一つのサブチャンネル(ランプ化サブチャンネル)にモデル化し、その中での平均的な熱流特性を計算すればよい。

COBRA-III Cコードの基礎方程式は以下の通りである。¹⁰⁾

① 連続の式

$$A_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} = - \sum_{j=1}^N w_{ij}$$

② エンタルピー保存式

$$\frac{1}{u_i'} \frac{\partial h'}{\partial t} + \frac{\partial h_i}{\partial x} = \frac{q_i'}{m_i} - \sum_{j=1}^N (t_i - t_j) \frac{c_{ij}}{m_i} - \sum_{j=1}^N (h_i - h_j) \frac{w_{ij}'}{m_i} + \sum_{j=1}^N (h_i - h^*) \frac{w_{ij}}{m_i},$$

$$u_i' = \frac{m_i}{A_i \left(\rho - h_{fg} \frac{\partial \phi}{\partial h} \right)} \quad : \text{実効エンタルピー輸送速度}$$

(均質二相流及び単相流では $u_i' = u_i$)

$$c_{ij} = \frac{S}{l} \lambda G_K$$

③ 軸方向運動量方程式

$$\frac{1}{A_i} \frac{\partial m_i}{\partial t} - 2 u_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial P_i}{\partial x} = - \left(\frac{m_i}{A_i} \right)^2 \left[\frac{v_i f_i \phi_i}{2 D_i} + \frac{K_i v_i'}{2 \Delta x} + A_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V_i'}{A_i} \right) \right] - g \rho_i \cos \theta - f_T \sum_{j=1}^N (u_i - u_j) \frac{w_{ij}'}{A_i} + \sum_{j=1}^N (2 u_i - u^*) \frac{w_{ij}}{A_i}$$

④ 横方向運動量方程式

$$\frac{\partial w_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (u^* w_{ij})}{\partial x} = \frac{S}{l} (P_i - P_j) - \frac{K |w_{ij}| w_{ij}}{2 S^2 \rho^*} \left(\frac{S}{l} \right).$$

Fig. A 2.1 及び A 2.2 に、通常のサブチャンネルとランプ化サブチャンネルの例を示す。ランプ化サブチャンネルモデルは上記基本方程式の中の横方向運動量方程式にのみ影響を与える。バンドルをランプ化サブチャンネルによってモデル化した場合には、各チャンネルの基本

入力パラメータ（流路面積，ぬれ縁長さ等）はランプ化サブチャンネルにおける現実的な値を入力しなければならない。具体的には，ギャップ幅 S ，コントロールボリューム間距離 l ，横方向流れ抵抗係数 K_{ij} ，流路面積 A 及びぬれ縁長さ P_w については，Fig.A 2.3 及び Table A 2.1 に示す値を入力しなければならない。但し， S ， l ， K_{ij} は，計算結果にそれほど敏感には反映されない。

(3) 単位セルモデルによるコード間の比較

スパイラルリブスペース型炉心を一つ取り上げて，単位セルモデルに基づく計算を GAPCON-THERMAL2 コードと COBRA-HCLWR コードの両方で行い，結果を比較し，計算法の違いの影響を検討した。計算は一次系ポンプ特性を考慮する場合としない場合について行った。

比較した炉心は，

$$Q_T = 3240 \text{ MWt}$$

$$P = 11 \text{ mm}$$

$$D = 9.5 \text{ mm}$$

$$L_C = 2.5 \text{ m}$$

スパイラルリブスペース

$$q_L = 16 \text{ kw/m}$$

$$F_{DH} = 1.5$$

過負荷 100%

である。流路面積，スパイラルリブ面積，ぬれ縁長さはそれぞれ 0.3391 cm^2 ， 0.018 cm^2 ， 2.985 cm である。

COBRA-HCLWR の熱流計算条件は以下の通りである。

単相乱流ミキシング

$$\text{横方向流れ抵抗係数} \quad w' = \beta S_K G, \quad \beta = 0.02$$

$$\text{横方向運動量パラメータ} \quad K_{ij} = 0.5$$

$$\text{乱流運動量パラメータ} \quad S/l = 0.5$$

$$\text{径方向熱伝導パラメータ} \quad f_T = 0.0$$

$$\text{軸方向分割数} \quad 30 \text{ 分割}$$

$$\text{等価クオリティ} \quad X = \frac{H - H_f}{H_g - H_f}$$

ボイド率 均質モデル

$$\alpha = \begin{cases} 0 & (X \leq 0) \\ \frac{X V_g}{(1-X)V_f + X V_g} & (X > 0) \end{cases}$$

サブクールドボイド 無

本計算は単位セルモデルで行っているために，上記条件の中で横方向流れに関するものは計算結果に影響を与えない。

一次系ポンプ特性を考慮しない場合

GAPCON-THERMAL2-HCとCOBRA-HCLWRの結果の比較をTable A 2.2に示す。COBRA-HCLWRによる計算は、ホットチャンネル入口条件をGAPCON-THERMAL2-HCの結果に一致させて行っているため、飽和蒸気圧表を用いた結果は、基本的にはGAPCON-THERMAL2-HCの結果と一致するものであるが、炉心圧損に関しては約7%の相異がみられる。これは、圧損評価法が両コードで異なり、COBRA-HCLWRでは軸方向各メッシュ点毎の圧力を積算するのに対して、GAPCON-THERMAL2-HCでは炉心平均温度を用いて算出していることと、後者コードでは、圧損評価にホットチャンネル流量を用いているためである（現在、GAPCON-THERMAL2-HCコードの炉心圧損評価には炉心平均流量を用いるように変更している）。しかし、最小DNBRについてみると、KfK及びEPRI相関式でそれぞれ0.1%、1.6%以内で一致している。EPRI相関式で若干の相違のみられる理由は、軸方向エンタルピーをメッシュ点で評価する形としているので正確にはエネルギーバランスがとれず、EPRI相関式には $\partial H / \partial Z$ の項があるためであると考えられる。

同表には、COBRA-HCLWRにおいて、温度・圧力に依存した水の物性値を使用した時の結果も示されている。入口条件の与え方（入口温度か入口エンタルピー）で結果が少し異なっているのは前節で述べたように温度とエンタルピーの変換が一对一の対応となっていないためである。しかし、圧力損失、最小DNBRとも差異は小さい。飽和蒸気表による結果と比較すると、水の物性値の温度・圧力依存性を考慮した場合、圧力損失は小さくなり、最小DNBRは大きくなる傾向がみられる。

一次系ポンプ特性を考慮した場合

結果をTable A 2.3に示す。GAPCON-THERMAL2-HCでは一次系流量をポンプ特性に基づいて決定する時の炉心圧損には、加速損失と重力による損失は含まれないが、COBRA-HCLWRではこれらの効果は自動的に考慮される形となっている。比較のため、本表のGAPCON-THERMAL2-HCの結果には、これらの効果を含めた値も並記している。

飽和蒸気表を用いた場合には、基本的に一致するはずであるが、(1)で指摘した理由によりCOBRA-HCLWRによる圧損はGAPCON-THERMAL2-HCと比較し、かなり高目に評価されている。その結果、一次系流量は小となり、冷却材入口温度は低下する傾向を示す。

水の物性値の違いの影響は、Q-H特性を考慮しているため(1)の同一流量の場合とは幾分異なっている。飽和蒸気表を使用した場合、一次系流量が小さくなり最小DNBRも小さくなっている。

最小DNBRに関しては、KfK、EPRIのいずれの相関式でも、飽和蒸気表を用いた場合が一番低くなり、GAPCON-THERMAL2-HCによる結果は、COBRA-HCLWRの結果と約1%以内で一致している。

以上より、単位セルモデルによる簡易計算に関しては、GAPCON-THERMAL2-HCとCOBRA-HCLWRの間で、その計算法及びモデルに帰因する圧損評価に幾分違いのみられるものの、重要なDNBRに関しては、ほぼ一致していることが確認された。

Table A2.1 Parameter variation with channel lumping

<u>parameter</u>	<u>Subchannel</u>	<u>N Columnar Lumping</u>	<u>2M Row Lumping</u>	<u>N Column 2M Row Lumping</u>	
W_j	W_j	$N W_j$	W_j	$N W_j$	} calculational variables
$(P_{ii}-P_{jj})$	$(P_{ii}-P_{jj})$	$(P_{ii}-P_{jj})$	$M (P_{ii}-P_{jj})$	$M (P_{ii}-P_{jj})$	
S	S	NS	S	NS	} input parameters
Q	Q	Q	$M Q$	$M Q$	
K_G	K_G	K_G	K_G	K_G	
A	A	NA	MA	NMA	
P_w	P_w	NP_w	MP_w	NMP_w	

Table A2.2 Comparison between GAPCON-THERMAL2-HC and COBRA-HCLWR
(unit cell model, without pump property)

Thermohydraulic properties	GAPCON-THERMAL2-HC		COBRA-HCLWR		f(T,P) ¹⁾		f(T,P) ²⁾	
	av.	Saturated	hot channel	av. hot channel	av. hot channel	av. hot channel	av. hot channel	hot channel
Pressure drop(kg/cm ²)								
heated section	3.178 (3.473)	3.734 (3.427)	3.589	3.684	3.565	3.678	3.548	
plenum	1.296	1.538 (1.415)	1.552	1.523	1.549	1.520	1.526	
MDNBR								
KfK	1.450		1.452		1.451		1.457	
EPRI	1.276		1.255		1.258		1.264	
Flow rate (kg/h)	582.8		582.8		582.8		582.8	
Mass flux (Gg/m ² h)	18.16	19.12 (18.16)	18.16	19.12	18.16	19.12	18.16	
Outlet								
quality	---	---	0.007	---	0.006	---	0.003	
void fraction	---	---	0.042	---	0.034	---	0.015	

* Hot channel : $F_{AH}=1.5$, mass flux is reduced by 5 %.

1) Inlet condition is given by inlet enthalpy.

2) Inlet condition is given by inlet temperature.

3) The value in parenthesis includes acceleration and gravitation losses.

4) The values in parenthesis correspond to the GAPCON-THERMAL2-HC calculation.

Table A2.3 Comparison between GAPCON-THERMAL2-HC and COBRA-HCLWR
(unit cell model, with pump property)

Thermohydraulic properties	GAPCON-THERMAL2-HC		COBRA-HCLWR	
	HC	Saturated av. hot channel	f(T,P) ¹⁾ av. hot channel	f(T,P) ²⁾ hot channel
Pressure drop(kg/cm ²)				
Total	7.846 (8.165)	8.213	8.323	8.323
Core	4.676 (4.994)	5.243	5.279	5.279
heated section	3.178 (3.473)	3.556	3.434	3.446
plenum	1.296	1.466	1.503	1.471
inlet	0.224	0.220	—	—
Others	3.171	2.970	—	3.044
Inlet temperature (C)	286.6	285.3	285.3	285.2
Mass flux (Gg/m ² h)	18.16	18.60	17.67	17.91
Flow rate(pri. loop) (Gg/h)	52.46	50.92	—	51.61
MDNBR				
KfK	1.450	—	1.434	1.460
EPRI	1.276	—	1.249	1.271

* Hot channel : F_{4H}=1.5, mass flux is reduced by 5 %.

1) Inlet condition is given by inlet enthalpy.

2) Inlet condition is given by inlet temperature.

3) The value in parenthesis includes acceleration and gravitation losses.

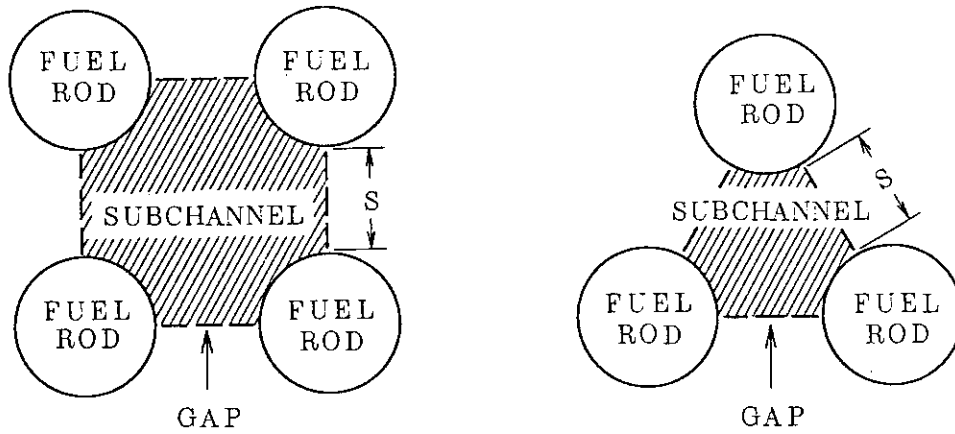


Fig.A2.1 Standard subchannels

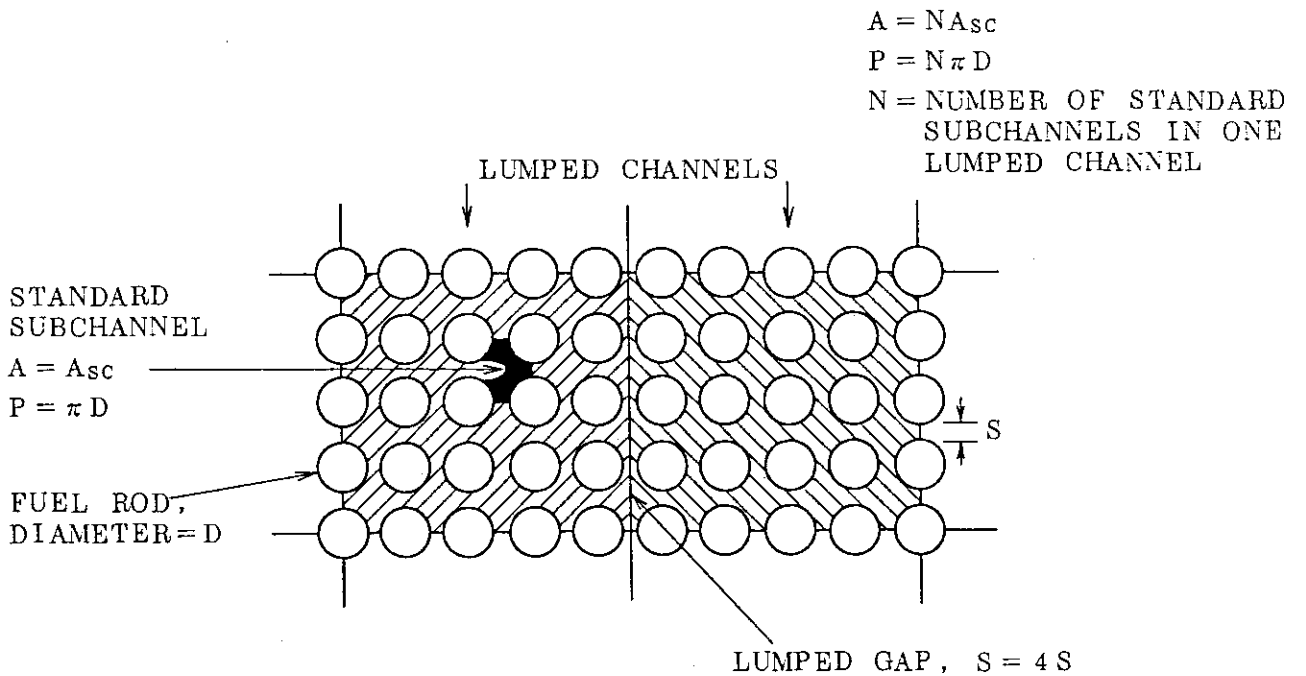


Fig.A2.2 Lumped subchannels

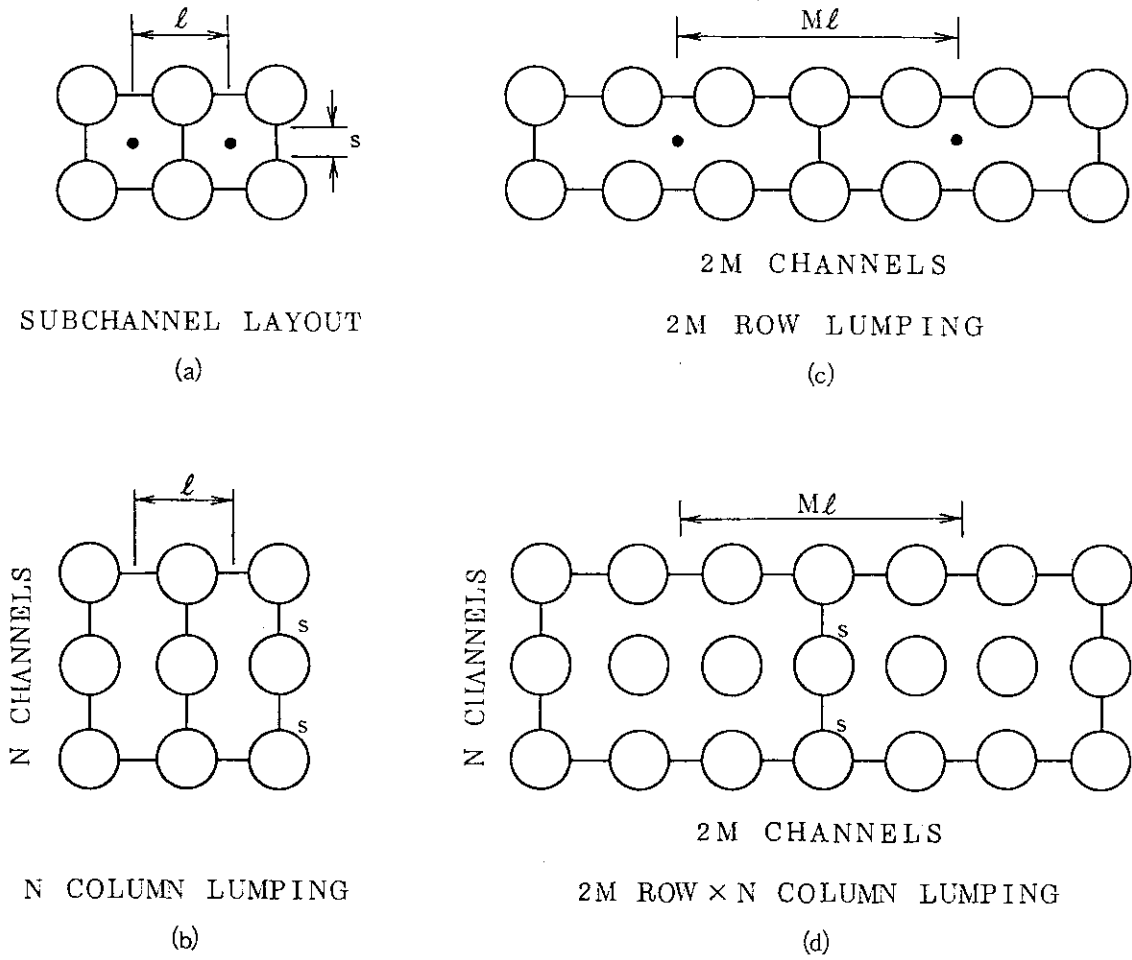


Fig.A2.3 Layout of lumped subchannels

付録3 GAPCON-THERMAL2-HCコードの入力方法

GAPCON-THERMAL2-HC コードの入力データは、GAPCON-THERMAL2 の入力データに新しく付加した高転換軽水炉解析オプションのためのデータを付加えたものである。以下に入力データの説明を行うが、DATA 1～9 が新しく付加したものである。スパイラルリブスパーサ型炉心の解析の入力例を Fig.A3.1 に示す。

DATA 1 TITLE タイトルカード
 (A80)

最初の4カラムに STOP をインプットすると
実行は、停止する。

DATA 2 NPROP,NGRID,PREF,
 INCHF,NPAVG,LHOT,MITER,MITQ
 (free)
NPROP---物性値のテーブルの数
NGRID---スパーサの種類
 <0 スパイラルリブスパーサ
 ≥0 グリッドスパーサ
 (絶対値はグリッド数を示す)
PREF --- 炉心運転圧 (kg/cm²a)
INCHF =1 物性値のテーブルを50番ユニットから読み込む。
 =0 物性値のテーブルを読み込まない。
NPAVG =0 ΔP_cを炉心各メッシュ点から評価する。
 =1 炉心平均温度からΔP_cを評価する。
 (いずれにしても一次系流量は炉心平均温度に対する圧
 損から決められる)
LHOT --- =1 DATA 6でホットチャンネル因子を指定しなければならない。
 =-1 ホットチャンネル因子は出口で飽和となる値 $F\Delta_H^S$ に設
 定される。
MITER 一次系流量計算のための最大反復回数 (デフォルト値は 100)
MITQ 炉出力計算の最大反復回数 (デフォルト値は 500)

DATA 3

NTIME,
 (NCHF \forall (I), I=1,NTIME)
 (free)
 NTIME--- 燃焼ステップ数
 NCHF \forall =0 CHF 評価を行わない。
 =1 CHF 評価を行う。

DATA 4

PITCH,APD,FD,BB
 (free)
 PITCH--- ピッチ (mm)
 APD --- 軸方向ピッチ/ピン直径
 FD --- ピン直径 (mm)
 BB --- リブ幅 (mm)

DATA 5

TINC*,TOUTC,WRATIO,QRATIO,WRHOT,FLOW*
 (free)
 TINC* --- 入口温度 (°C)
 TOUTC --- 原子炉容器出口温度 (°C)
 WRATIO --- 炉心流量割合
 WRATIO < 0.0 のとき WRATIO=1.0
 QRATIO --- 原子炉出力割合
 QRATIO \leq 0.0 のとき QRATIO=1.0
 WRHOT --- ホットチャンネル流量割合
 WRHOT < 0 のとき WRHOT=1.0
 FLOW* --- 一次系流量 (kg/h)

*) 入口温度及び一次系流量の initial guess

DATA 6

(HCF(I), I=1, 2)
 (2E10.2)
 HCF(1)--- $F\Delta_H$ (LHOT=-1 では無視される)
 HCF(2)--- F_G (ダミー)
 注) 軸方向出力分布はピーク値 1.55 の Chopped Cosine 分布に設定される。

DATA 7

OPF--- 過出力係数
 (free)

DATA 8
/PUMP/

<NAMELISTによる入力>
一次系特性

AA1	} ポンプ特性 ($H(m) = AA1 \times Q(m^3/s) + AA2$)	(-23.163)
AA2		(192.69)
COEFIN	: 炉心入口損失係数	(1.2)
HRO	: 基準 PWR の炉心以外の圧損(m) ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)	(42.0)
FLOWO	: 基準 PWR の一次系流量(kg/hr)	(60.1×10^6)
TINO	: 基準 PWR の入口温度(°C)	(289=552.2 °F)
TAVO	: 基準 PWR の炉心平均温度(°C)	(307=584.6 °F)
LOOP	: ループ数	(4)

() 内の値はデフォルト値。

DATA 9
/SG/

<NAMELISTによる入力>
二次系特性

UAFO	: 基準 PWR プラント SG 一基の $U \times A$ (MW/°C)	(32.799)
PSO	: 基準 PWR プラント二次系圧力(kg/cm ²)	(62.5)
C1	} 総括熱貫流係数 の関係式の係数	(0.2)
C2		(0.8)
C3		(0.6)
C4		(0.1)
C5		(0.25)
C6		(0.1)

DATA 10 TITLE ...タイトルカード
 (20A4)
 TITLE(1)= STOPのとき
 実行は、停止する。

DATA 11 <NAMELISTによる入力>
 /INPUT/ ATMOS、
 CRUDTH、CTHICK、
 DBO、DCO、
 DSINZ、DVOIDZ、
 FRACAR、FRACH、
 FRACHE、FRACKR、FRAGN、
 FRACXE、FRDEN、FRSIN、
 FRPUO2、
 FR35、FR40、FR41、FR42、
 GAPC、
 HPLEN、
 ICDF、ICOR、ICREP、
 IPENSF、IGAS、IOUTPR
 IPEAK、IRELOC、IRELSE、
 IRL、ISTOR、IT、
 KB、KOOL、
 LFUEL、LVOIDZ、
 MINI、
 NCLAD、NFLX、NFUEL、
 NOH、NPOW、NPRFIL、
 NTIME、
 PRCDH、PROFIL、PSEUDO、
 QTOTAL、
 ROUC、ROUF、
 S、SIGHF、
 TIME、TM、TPLAS、
 XCO、XH、XN、
 ZCLAD

次頁にNAMELIST文の説明を示す。(単位系に注意)

変数名	単位	定義
ATMOS	atm	初期封入ガス圧
CRUDTH	inch	クラッドに付着したcrudの厚さ ここで、crudの熱伝導率は0.23Btu/hr.ft.F と設定している
CTHICK	mm	クラッドの厚さ
DBO	inch	2番目のクラッドがバスケットの外径、指定しない場合、2番目のクラッドはないものとみなす
DCO	mm	クラッドの外径 ここで、クラッドの内径 $DCI=DCO-2CTHICK$ ペレットの外径 $DFS=DCI-2GAPS$ となる
DSINZ	inch	再組織化燃料の初期直径 (標準は0.0)
DVOIDZ	//	ペレットの初期中心空孔径
FRACAR		初期封入 アルゴンガス割合 (0.0)
FRACH	//	水素 // (0.0)
FRACHE	//	ヘリウム // (1.0)
FRACKR	//	クリプトン // (0.0)
FRACN	//	チッ素 // (0.0)
FRACXE	//	キセノン // (0.0)
FRDEN		ペレットのfractional density
FRSIN		再組織化後の //
FRPUO2		PuO_2 の重量比 (残りは UO_2 とみなされる)
FR35		U^{235} の重量比 (残りは U^{238} //)
FR40		Pu^{240} //
FR41		Pu^{241} //
FR42		Pu^{242} //
GAPC	mm	クラッド・ペレット間ギャップ幅
HPLEN	cm	プレナム長
ICDF		≠0 ...クラッドの弾性変形を考慮する =0 ...このオプション使用せず
ICOR		PWR Zr-冷却材 (<3) または、 BWR Zr-冷却材 (>3) の 酸化率のためのsignal
ICREP		クラッドのクリープダウン値の数を入力するオプション =0 ...時間に依存しないクラッド変形を仮定する >0 ...時間とクリープダウン値をテーブル形式で入力する
IDENSF		=0 ...焼きしまりを考慮せず ≠0 ...焼きしまりによる寸法変化を考慮する
IGAS		ガス放出モデルのオプション =0 ...最適評価 ≠0 ...95%信頼度評価

変数名	単位	定義
IOUTPR		結果のアウトプットオプション (タイムステップ数だけ必要) =0 i time step の結果をアウトプットする ≠0 " " しない
IPEAK		=0 ピーク出力をPSEUDOから入力する ≠0 平均出力を "
IRELOC		A signal that allows the user to use the fuel relocation model developed for this code. If IRELOC=0 change in fuel diameter due to relocation is 0, (i.e., relocation is not taken into account). If IRELOC>0 the change in fuel radius due to relocation is taken into account by a best estimate value. If IRELOC<0 the change in fuel radius due to relocation is taken into account by a conservative estimate i.e. gives less gap closure.
IRELSE		An integer signal to designate at which time the fission gas is to be released, during the time step (normal power operation) or after the time step (which would correspond to a reactor shut down or change in power). If IRELSE=0 the gas is released during the time step. If IRELSE≠0 the gas is released after the time step.
IRL		An integer to specify the output of flux depression values (from subroutine DEPRES). If IRL=0 eleven flux depression values and their respective pellet diameters will be printed out, with the first value given at the pellet centerline and the last at the pellet surface. If IRL>0 the subroutine DEPRES will divide the fuel pellet into IRL equal nodes and print out the flux depression values and their appropriate diameters at the midplane of each node.
ISTOR		An integer to specify the calculation of stored energy in the fuel. If ISTOR=0 no calculation is performed. If ISTOR≠0 the calculation is performed.
IT		A signal that allows the user to input the duration of the irradiation as burnup, MWd/MTM. These burnup values are read in through the namelist variable array TIME when IT≠0. For regular input (days) set IT=0 and use array TIME to read in the values.

変数名	単位	定義
KB		Thermal conductivity of the secondary cladding or basket (Btu/hr-ft ² °F).
KOOL		If a value (integer) greater than zero is assigned to KOOL, the cladding I.D. temperature is the same as the coolant temperature.
LFUEL	m	炉心高さ
LVOIDZ		Length of initial central void in the fuel pellets (inches).
MINI		An integer signal to specify the output wanted. If MINI>0 a complete summary is given for each axial segment. If MINI=0 a complete summary is listed for the hottest segment of the pin and a short summary given for all the axial segments. MINI<0 only a shorts summary is given for the axial segments.
NCLAD		An integer signal to specify type of cladding. If NCLAD=0, cladding is Zircaloy. If NCLAD<0, cladding is 304 SS. If NCLAD>0, cladding is properties are input as described previously with the number of points (temperatures) input equal to NCLAD.
NFLX		An integer signal to specify flux depression values used. If NFLX=0, flux depression values will be estimated in Subroutine DEPRES. NFLX should not be set to less than zero for fuel pins containing PuO ₂ or for pins in which ²³⁵ U enrichment is greater than 4% If NFLX<0, it is assumed there is no flux depression. If NFLX>0, a table of relative flux versus diameter is input as described previously with the number of points (diameters) equal to NFLX.

変数名	単位	定義
NFUEL		<p>An integer signal to specify the use of recycled UO_2-PuO_2; fuel thermal conductivity and melting temperature are changed accordingly.</p> <p>If NFUEL=0 the thermal conductivity equation for UO_2 is used.</p> <p>If NFUEL<0 the thermal conductivity equation for recycled UO_2-PuO_2 is used.</p> <p>If NFUEL>0 a table of thermal conductivity values must be input.</p>
NOH		<p>An integer signal to specify disposition of the hydrogen present in the sorbed gas. If NOH=0, the hydrogen is assumed to react with the cladding. If NOH\neq0, the hydrogen is assumed to remain in the fuel pin as a gas.</p>
NPOW		軸方向燃料分割数 (最大90)
NPRFIL		<p>An integer signal to specify the number of axial power profiles, PROFIL, to be used for all time steps. If NPRFIL>1, then NPRFIL=NTIME(i.e. an axial profile for each time step.)</p>
NTIME		<p>Number of time increments. LIMIT (15)</p>
PRCDH		<p>Percent of fuel column volume that is dish volume (i.e., $100 \times$ total dish volume/total fuel column volume).</p>
PROFIL		<p>A table that is used to input a normalized axial power profile for the pin.</p> <p>NPOW+1 values for each profile needs to be input with the first and last values corresponding to the bottom and top of the fuel respectively. If more than one axial profile is to be used, then NPRFIL \times (NPOW+1) values have to be input in this table. If a power profile is not input a standard one in the code will be used.</p>

変数名	単位	定義
PSEUDO KW/m		Power for each time step (KW/m) allows the user to follow a power history. NTIME values need to be input. PSEUDO (1) and PSEUDO (2) may not=0. (See IPEAK)
QTOTAL	MWt	原子炉熱出力
ROUC		Arithmetic mean cladding ID surface roughness (inches).
ROUF		Arithmetic mean fuel surface roughness (inches).
S		Fuel sorbed gas content (cc/g of fuel).
SIGHF		冷却材の種類を指定するための signal (i) SIGHF<0 ならば冷却材は、 水で、熱伝達率は、計算による (ii) SIGHF>0 ならば冷却材は、 指定しない 熱伝達率は、SIGHF にセットされる
TIME		A set of accumulative time increments (days) allows the user to follow a power history. NTIME values need to be input. LIMIT (15) values TIME (1) must=0. Time (x) must be larger than previous time, time (x-1).
TM		Melting temperature of the fuel(°C). If no value is input the code uses 2790°C
TPLAS		The temperature at which the fuel becomes plastic. If no value is input the code uses 1200 °C.
XCO		Fraction of sorbed gas that is carbon monoxide and carbon dioxide.
XH		Fraction of sorbed gas that is hydrogen and moisture.
XN		Fraction of sorbed gas that is nitrogen. Note: XCO + XH + XN should=1.0 when S>0.

変数名	単位	定義
ZCLAD		An integer signal to specify Zr-2 or Zr-4 cladding. Material properties. If ZCLAD>0, cladding is Zr-4. If ZCLAD<0, cladding is Zr-2. NOTE: NCLAD must have a value of 0 to use ZCLAD.

DATA 12 ((CF(I,J), I=1,3), J=1, NFUEL))
(3E10.2)

フェエルベレットの熱伝導率入力

注)DATA 11で NFUEL>0のとき入力する

DATA 13 ((AA(I,J), I=1,7), J=1, NCLAD))
(7E10.2)

グラッドの物性値入力

注)DATA 11で NCLAD>0のとき入力する

DATA 14 ((RV(I,J), I=1,2), J=1, NFLX))
(2E10.2)

flux depression の入力

注)DATA 11で NFLX>0 のとき入力する

DATA 15 ((CLCRP(I,J), I=1,2), J=1, iCREP))
(F10.0,E10.0)

グラッドのクリープダウンの入力

time \leftrightarrow creep down value

: :

注)DATA 11で iCREP>0のとき入力する

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER ██████████,SA.FUJII,0431.01
I.3W.OC.1
T.2
OPTP PASSWORD=██████,MSGCLASS=R
// EXEC LMGO,LM='J2350.¥DATAP'
//FT10F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(,PASS),DSN=&&DATA1,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200),SPACE=(TRK,(2,2))
JAERI HCLWR-J1 (P=11.1,D=9.5,Q=16.9, LF=2.23, 100%)
127 -1 159.0 1 1 100 500 /
15 1 ,14*0
11.1 20.0 9.5 0.533
289.0 325.0 0.95 1.00 0.95 60.1E6
1.50 2.41 0.0 0.0 0.0
1.00
¥PUMP
¥END
¥SG
¥END
JAERI HCLWR-J1 (P=11.1,D=9.5,Q=16.9, LF=2.23, 100%)
¥INPUT
QTOTAL =3411.,
DCO =9.5,
PSEUDO =15*16.9,
LFUEL =2.23,
HPLEN =100.,
ATMOS =10.0,
GAPC =.085,
PRCDH =0.0,
IRELOC =0,
IDENSF =0,
IGAS =0,
MINI =-1,
FRDEN =.930,FRSIN=.965,FR35=1.975E-3,
NCLAD =-1,FRACHE=1.0,
SIGHF =-5000.,ROUF=.000039,ROUC=.00002,TM=2550.,
NPOW =30,
ISTOR =1,FR40=.25132,FR41=.10158,FRPU02=.08,NFUEL=-1,
FR42 =0.07775,
NPRFIL=1,IPEAK=-1,
NTIME =9,
IT = 1,
TIME =0.0,5000.,10000.,15000.,20000.,25000.,30000.,35000.,40000.,
¥END
STOP
// EXEC FORT77,SO='J3803.¥GAPCNXX',A='ELM(FLCAL),NOPRINT'
// EXEC FORT77,SO='J3803.¥GAPCONX',A='ELM(*)',NOPRINT',DISP=MOD
// EXEC LKED
// EXEC GO
//FT05F001 DD DSN=&&DATA1,DISP=(OLD,DELETE)
//FT50F001 DD DSN=J3803.¥WPROPA.DATA(WATER1),DISP=SHR
/*
++
//

```

Fig.A3.1 Sample JCL and data of GAPCON-THERMAL2-HC code

付録4 COBRA-HCLWRコードの入力方法

COBRA-HCLWR の入力データは、基本的に COBRA-III C の入力データを保持しつつ、高転換軽水炉解析用オプションのための数枚の入力データを付加した形式となっている。したがって、入力データはコントロールカード（カードラベル COBRA.1, SETUP.0.1, SETUP.0.2）、グループ単位の入力データと NAMELIST による入力データより構成される。

- ①カードラベルは、各データカードあるいはデータのタイプ（複数のカードを読み込む場合）に割当ててある。
- ②各ラベルをもった入力データの組に対して読み込みフォーマットが与えられる。
- ③ラベルは読み込みが行われるグループ名とそのグループ内での相対的な読み込み順序によって表されている。例えば、GROUP.2 はグループ2のグループコントロールカードを表し、GROUP.2.3 はグループコントロールカードを除いてグループ2で読み込まれる第3のカードまたはカードのタイプを表している。
- ④カードラベルGROUP.1から始めるとグループはCOBRA-III Cと同様に12ある。各グループは次の形式のグループコントロールカードを読み込むことによってアクセスされる。

```
READ (5,5001) NGROUP,N1,N2,-----,N8,N9
```

ここで NGROUP はグループの番号である。したがって、入力はグループ単位で行い、各グループの入力は任意の順序で行うことができる。

新しく付加したオプションの多くを含む入力データの例を Fig.A4.1 に示す。これは第三章の2-バンドルモデルの入力例である。

COBRAには、ユーザの指定するいくつかの経験的相関式がインプットされる。どのような相関式が必要なのかを明らかにするため、相関式は各インプット毎に詳しく述べる。インプットの作成では、ユーザをより深く助けるために、計算のパラメータの多くは、ユーザがパラメータのインプットフィールドをブランクにしておいても、コード内で有効となるように、デフォルト値がセットされている。デフォルト値をもつパラメータは、インプットの構成の中で指定されたデフォルト値が与えられる。デフォルト値をもつパラメータの大部分が、解の安定性に影響するので、デフォルト値は、各パラメータをよく知ってから使うようにしなければならない。

データカード・グループコントロールカード

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
COBRA.1	<u>MAXT</u>	Format(15) インプットデッキの最初のカード 1度だけ読まれる。
	MAXT	= 問題の計算のために許容される計算機のタイム ・リミット (秒単位) MAXTが限度を越えても、結果をプリントすること を考慮して計算機のCPタイム・リミットは、 MAXTより大きくなければならない。 MATX<1のとき、MAXT=1000 (固定)
SETUP.0.1	<u>KASE, J1</u>	Format(215) コントロールカード
	KASE	= 問題のケース番号 KASE ≥ 1 コアを0に初期化して、そのケースを 始める KASE < 1 STOP
	J1	= インプットデータのプリントオプション J1=0 新しいインプットデータのみプリントする J1=1 すべてのインプットデータをプリントする J1=2 操作の状態のみプリントする J1=10 すべてのインプットデータをプリントして STOP
SETUP.0.2	<u>TEXT</u>	Format(20A4)
	TEXT	= 問題の認識のためのアウトプット・テキスト 最大80文字

グループのインプットデータ

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
GROUP. 1	GROUP 1	物性値テーブル Format(10I6)
	N1	= NPROP 読み込む物性値のデータ個数
	N2	= ISTEAM N2=0 過熱蒸気の物性値は使用しない N2=1 N1個の過熱蒸気の物性値をコード内で計算する
	N3	= 過熱蒸気の物性値の範囲 N2=0のときは適用できない デフォルト値はN3=0で、このときコードは系の圧力における飽和温度から1500FまでのN1個の過熱蒸気の物性値を計算する N3=1のとき、コードはDTMAX(GROUP. 1. 1)で指定される温度の限界を越えて、N1個の物性値を計算する
	N4	= NFUNC N4=0 物性値は、飽和蒸気圧表をテーブル形式で読み込む。50番ユニットから(*)欄に記された物性値が読み込まれる。50番ユニットに水の飽和蒸気圧表をセットする場合に、J3803. \$WPROPA. DATAにデータが用意されている。

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
---------	-----	-----------

N4=1 水の物性値は、コード内蔵の関数(RETRAN 02使用)により計算される。

N4=2 IFC 1967の水の蒸気表が用いられる。
現在使用禁止

N5 = NLOOP

N5=0 一次系ポンプQ-H特性を考慮しない。

N5=1 一次系ポンプQ-H特性を考慮する。

(*)

[PP(I), TT(I), VVF(I), VVG(I), HHE(I), HHG(I),
KKF(I), UUF(I), I=1, N1] Format (8E10.2)

N1枚の飽和水と飽和蒸気の物性値のカードを読み込む。

PP = 系の圧力 (psia)

TT = 温度 (F)

VVF = 水の比容積 (ft^3 / lb)

VVG = 蒸気の比容積 (ft^3 / lb)

HHE = 水のエンタルピー (Btu / lb)

HHG = 蒸気のエンタルピー (Btu / lb)

KKF = 水の熱伝導率 (Btu / ft · hr · F)

UUF = 水の粘性係数 (lb / ft · hr)

表面張力は、1980 日本機械学会蒸気表の内挿式からコード内で計算される。

GROUP. 1. 1

DTHAX Format (E 10.2)

オプション・インプット N2=1かつN3=1で入力

DTHAX = 過熱蒸気の物性値を計算する温度範囲

$DTHAX = (T - T_{\text{saturation}})$

ここで、Tは必要な最高温度である。

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 2	GROUP. 2	摩擦係数及び2相流相関式 Format (10I6)
	N1	= J2 サブクール・ボイドの相関式 N1=0 サブクール・ボイドはない N1=1 サブクール・ボイドはLevyのサブクール・ボイドモデルを使って計算される。
	N2	= J3 ボイド率相関式 N2=0 均質モデル N2=1 修正Armandのモデル N2=5 スリップ・モデル Slip ratioを入力する必要がある。 N2=6 ボイド率をスチーム・クォリティの多項式関数で入力する。項の数と係数を、6次の多項式まで読み込む。
	N3	= J4 2相流摩擦損失倍数 N3=0 均質モデル N3=1 Armandのモデル 2相流摩擦損失倍数をクォリティの多項式関数で入力する。項の数と係数を、6次の多項式まで読み込む。
	N4	= NVISCW 壁面粘性係数相関式 N4=0 摩擦係数は非加熱相関式 N4=1 摩擦係数は加熱相関式

(注) サブクール・ボイド相関式, ボイド率相関式, 2相流摩擦損失倍数相関式は、
後続ページ参照

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 2. 1	[AA(I), BB(I), CC(I), I=1, 4]	Format (8E10.2) 乱流摩擦係数は、以下の形式である。4種類までセットすることができる。 $f = AA(Re)^{BB} + CC$ の形式の相関式で表される。 ただし、グループ4カードでサブチャンネルタイプを5とした場合は無視される。(スパイラル・リブ)
GROUP. 2. 2	NV, AV	Format (I5, E10.5) オプション・インプット N2>4で入力 NV = N2=6のときはボイド率の多項式のオーダー N2=5のときはNVは使用しない AV = N2=6のときは $\alpha = a_0 + a_1 X + \dots + a_6 X^6$ の a_0, a_1, \dots, a_6 を入力する N2=5のときは定数値とする
GROUP. 2. 3	NF, AF	Format (I5, E10.5) オプション・インプット N3>4で入力 NF = 2相流摩擦損失倍数 クオリティの多項式関数の項の数 AF = 多項式関数の6次のオーダーまでの係数 $\phi = a_0 + a_1 X + \dots + a_n X^n$

(注) サブクール・ボイド相関式, ボイド率相関式, 2相流摩擦損失倍数相関式は、次ページ参照

サブクール・ボイド相関式

$$X = 0.$$

$$X_e < X_d$$

$$X = X_e = X_d \exp \left(-\frac{X_e}{X_d} - 1 \right)$$

$$X_e / X_d < 1$$

where X_e is the equilibrium quality and

$$X_d = -\frac{C_p \Delta T}{h_{fg}}$$

$$\Delta T = \frac{q'}{P_h h} - Q P_r Y_B \quad 0 < Y_B \leq 5$$

$$\Delta T = \frac{q'}{P_h h} - 5Q(P_r + \log(1 + P_r (2Y_B - 1))) \quad 5 < Y_B \leq 30$$

$$\Delta T = \frac{q'}{P_h h} = 5Q(P_r + \log(1 + 5P_r)) + \frac{1}{2} \log\left(\frac{Y_B}{30}\right) \quad 30 < Y_B$$

$$Q = \frac{q'}{P_F V} C_p \sqrt{\tau_W V}$$

$$\tau_W = \frac{fv}{8} \left(\frac{m}{A} \right)^2$$

$$Y_B = \frac{0.015}{\mu} \sqrt{\frac{\sigma D}{V}}$$

ボイド率相関式Homogeneous Model

$$\alpha = 0. \quad X \leq 0.$$

$$\alpha = \frac{Xv_g}{(1-X)v_f + Xv_g} \quad X < 0.$$

Slip Model

$$\alpha = 0. \quad X \leq 0.$$

$$\alpha = \frac{Xv_g}{(1-X)v_f \gamma + Xv_g} \quad X > 0.$$

where γ is a specified slip ratio.

Modified Armand

$$\alpha = 0. \quad X \leq 0.$$

$$\alpha = \frac{(0.833+0.167X)Xv_g}{(1-X)v_f + Xv_g} \quad X > 0.$$

Polynomial Function

$$\alpha = 0. \quad X \leq 0.$$

$$\alpha = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \quad X > 0.$$

2相流摩擦損失倍数相關式Homogeneous Model

$$\phi = 1.0 \quad X < 0.$$

$$\phi = \frac{\rho_f}{\rho} \quad X > 0.$$

Armand

$$\phi = 1.0 \quad \alpha \leq 0$$

$$\phi = \frac{(1-X)}{(1-\alpha)^{1.42}} \quad 0.39 < (1-\alpha) \leq 1.0$$

$$\phi = 0.478 \frac{(1-X)^2}{(1-\alpha)^{2.2}} \quad 0.1 < (1-\alpha) \leq 0.39$$

$$\phi = 1.730 \frac{(1-X)^2}{(1-\alpha)^{1.64}} \quad 0. < (1-\alpha) \leq 0.1$$

Polynomial Function

$$\phi = 1.0 \quad X \leq 0$$

$$\phi = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \quad X \geq 0$$

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 3	GROUP. 3	軸方向熱流束のテーブル Format (10I6)
	N1	= NAX 熱流束テーブルの入力データの数
	N2	= NAXY N2≠0 GROUP. 3.1 はskipする N2=0 カードGROUP. 3.1 が入力される N2=-1 コード内蔵式 (chopped cosine分布, ピーク=1.55) から入力される
GROUP. 3.1	[Y(I), AXIAL(I), I=1, N1]	Format (8E10.2)
		軸方向熱流束のテーブル
		オプション・インプット N2=0 で入力
	Y	= 熱流束の与えられる相対的な位置 (X/L) ここで、Lはバンドルの長さの総計である。 両端の点である 0.0と 1.0も含む。
	AXIAL	= (X/L) における相対的な熱流束 (各位置における Flux / AVG. Flux)

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
GROUP. 4	<u>GROUP. 4 チャンネル・レイアウトとディメンションFormat (1016)</u>	
	N1	= 読み込むサブチャンネルのデータカードの枚数。 予め指定されていない限り、各サブチャンネルにつき1枚のカードが必要 (例えば、リスタート・ケース)
	N2	= サブチャンネルの総数、N1に無関係

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 4. 1	DO * J=1, N1	
	<u>N, I, AC(I), PW(I), PH(I), AFIN(I), ZFIN(I),</u>	
	<u>(LC(I, L), GAPS(I, L), DIST(I, L), L=1, 4)</u>	
	* CONTINUE	Format(I1, I4, 5X, 5E10. 2/4(I4, 2E8. 2))
	N	= サブチャンネルのタイプ ブランクまたは0のとき、タイプ1が割りあてられる N>0 タイプNが割りあてられる N>4 サブチャンネルのタイプは、特定の摩擦係数が使われることを意味する (GROUP. 2. 1) N=5 スパイラル・リブ型のサブチャンネル・タイプを指定
	I	= サブチャンネルの番号
	AC	= ノミナル・サブチャンネルの占める断面積 (in ²) (リブ面積を含む)
	PW	= ノミナル・サブチャンネルの濡縁長さ(in)
	PH	= ノミナル・サブチャンネルの加熱長さ(in)
	AFIN	= ヘリカルフィンの占める断面積(in ²) デフォルト値は 0
	ZFIN	= ヘリカルフィンの占める長さ(in) デフォルト値は 0
	LC	= 隣接するサブチャンネルの番号 サブチャンネル I に隣接する最高4つまでのサブチャンネルを指定できる。サブチャンネル番号を昇順にする場合、LC(I, L)>I のときのみ入力する
	GAPS	= サブチャンネル I と LC で指定される隣接するサブチャンネルとの間のノミナル・ギャップ幅(in)
	DIST	= LC で指定される隣接するサブチャンネル間の中心間距離 (SL = GAPS/DIST と計算される) DIST=0 のときは SL を先に定義する必要があり、DIST=GAPS/SL で計算する

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 5	GROUP. 5	サブチャンネルの面積バリエーション Format (10I6)
	N1	= NAFACT 面積バリエーションテーブルを読み込むサブチャンネルの数
	N2	= MAXL サブチャンネルの面積バリエーションのための軸方向の位置の数 N2<1のとき、GROUP. 5. 1 はskipする
	N3	= NARAMP 面積バリエーションのgradual insertion の反復回数 デフォルト値はNARAMP=1である リスタートケースのとき必要ならば、NARAMPは再び読み込まなければならない
GROUP. 5. 1	[AXL(I), I=1, N2]	Format (8E10. 2) 軸方向位置のテーブル
	AXL	= サブチャンネルの面積バリエーションの指定される軸方向位置(X/L) GROUP. 5. 2 で指定されるすべてのサブチャンネルに割りあてられる値を、N2個の値に読み込む。
GROUP. 5. 2	DO * J=1, N1 I, (AFACT(J, L), L=1, N2) * CONTINUE	Format (I5/(12F5. 3)) N1個のサブチャンネルについて(AXL) に対応するN2個の軸方向位置での面積バリエーション因子を読む。
	I	= どの面積バリエーションが指定されるかを示すサブチャンネルの認識番号 フォーマット(I5)に従って読んだら、次のカードへskipして、AXL の位置に対応して、因子のセットAFACT を全て読む。N1個のサブチャンネルに因子が読み込まれるまでくり返す。
	AFACT	= 各軸レベル(AXL) における相対的なサブチャンネルの面積($A_i / A_{Nominal}$)

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
GROUP. 6	<u>GROUP. 6</u> <u>ギャップサイズバリエーション</u>	Format (10I6)
	N1 = NGAPS	ギャップバリエーションを入力するGAPSの個数
	N2 = NGXL	ギャップバリエーションの軸方向個数
GROUP. 6. 1	<u>[GAPXL(L), L=1, N2]</u>	Format (8E10.2)
	GAPXL =	ギャップ・バリエーションを考慮する軸方向位置(X/L)
GROUP. 6. 2	<u>[K, (GFACT(L, LL), L=1, N2), LL=1, N1]</u>	Format (15/(8E10.2))
	K =	バリエーションするギャップ番号
	GFACT =	ギャップ番号K のギャップバリエーション係数 GFACT=(GAP _I / GAPN _{nominal})

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
GROUP. 7	GROUP. 7	ワイヤーラップとスペーサーの入力情報 Format(10I6)
	N1	= J6 N1=1 スパイラルリブスペーサーのインプットののみ N1=2 グリッドスペーサーのインプットののみ N1=3 ワイヤラップのインプットとグリッドスペーサー損失係数のインプットの両方
	N2	= NGRID グリッドスペーサの軸方向位置の数
	N3	= NGRIDT グリッドタイプの数
	N4	= NRAMP グリッドによる圧損をランプ化して扱うための反復回数
	N5	= NJUMP リスタート・フラグ N5=0 定常状態または非定常の解からの連続計算。追加データは読み込まない。 N5=1 前の解を初期guess 値とする問題あるいは、追加データの必要な連続計算ケース N5=2 N5=0と同じであるが、すべてのインプットデータはプリントされる。 N5=3 ダンプ・テープを読み、インプットと結果をプリントしてSTOPする。

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 7. 1	<u>PITCH, DIA, THICK</u>	Format (3E10.5)
	オプション・インプット	N1=1,3で入力
		ワイヤーラップ仕様
	PITCH	= ワイヤーラップピッチ(in)
	DIA	= ロッドまたはクラッドの外径(in)
	THICK	= ワイヤーラップの直径(in)
GROUP. 7. 2	<u>K, DUR(K), (XCROSS(K, L), L=1, 6)</u>	Format (I5, 5X, 7E10.2)
	オプション・インプット	N1=1,3で入力
		Wrap Crossing データ
	K	= ギャップの番号
	DUR	= クロスフローのforcing のためのピッチ長さの 有効な部分。推奨値は DUR= ΔX /PITCH ここで、 ΔX はaxial nodeの長さ(in) PITCH はワイヤーラップピッチ(in)
	XCROSS	= ワイヤーラップクロスの角度 XCROSSはGAP とワイヤー (バンドル入口で) の なす角度を 360° で割って計算する。 ラップの巻く方向が小さい番号から大きい番号 のサブチャンネルならば、この値は正で、そうで ないときは負である。 ワイヤーラップがバンドル入口で、ギャップ境 界上にあるならXCROSSは± 1.0で 0としない。
GROUP. 7. 3	<u>(NWRAPS(I), I=1, NCHANL)</u>	Format (10I5)
	オプション・インプット	N1=1,3で入力
		ラップ・インベントリー
	NWRAPS	= 各サブチャンネルのワイヤーの数 bundle入口におけるワイヤーの数を整数値で読 む。ワイヤーがギャップ境界に位置する場合には、 進行方向のサブチャンネルにあると考える。 すべてのチャンネルの値を読み込む。 1枚のデータカードに10個の値までインプット される。

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 7. 4	<u>(GRIDXL(I), IGRID(I), I=1, N2)</u>	Format (6(E 5.2, I5))
	オプション・インプット	N1=2, 3で入力
		グリッドの軸方向位置とグリッドのタイプ
	GRIDXL	= グリッドスペーサーの相対的位置(X/L)
	IGRID	= 軸方向位置GRIDXLにおけるグリッドタイプ
GROUP. 7. 5	<u>[(J, CD(J, I), K, FXFLOW(K, I), II=1, NCHNL), I=1, N3]</u>	Format (I5, E 5.2, I5, E 5.2)
	オプション・インプット	N1=2, 3で入力
		必要ならば各グリッドタイプの各サブチャンネルについて損失係数と forced crossflowを読む。
	NCHANL	= サブチャンネルの総数 グリッドタイプ1のすべてのサブチャンネルのデータを読む。 そして次につづくグリッドタイプをくり返す
	J	= サブチャンネルの認識番号
	CD	= グリッドタイプ I に対するサブチャンネル J の損失係数
	K	= GAP associated with subchannel J, through which forced diversion crossflow is specified. If blank, no forced crossflow.
	FXFLOW	= Fraction of axial flow which is diverted through GAP K for grid type I. If blank, no forced crossflow.

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP.8	GROUP.8	ロッド・レイアウトと燃料の物性値 Format (10I6)
	N1	= 読み込むロッド・データ・カードの枚数 モデル化された各ロッドについて1枚のカードが必要である。リスタート・ケースまたは重複ケースの実行のためには新しいロッドのインプットのみが必要である。
	N2	= NROD N1に無関係に、モデル化されるロッドの総数
	N3	= NODESF 燃料ペレットの分割数 N3=0のときは燃料モデルはない
	N4	= NFUELT 熱特性と指定する燃料物質の数 N3=0のときは不適當 デフォルト値はNFUELT=1とする
	N5	= NCHF CHF 相関式のオプション N5=0 CHF の計算はしない N5=1 BAW-2 相関式を用いる N5=2 W-3 相関式を用いる N5=3 スパイラル用KfK 相関式及びB&W-VPI&SU 相関式(EPRI)を用いる N5=4 使用禁止

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
---------	-----	-----------

GROUP. 8. 1	<u>N, I, DR(I), RADIAL, (LR(I, L), PHI(I, L), L=1, 6)</u>	Format(I2, I4, 2E7. 2, 6(I4, E6. 2))
	ロッド・インプットデータをN1枚のカードで読み込む	
N	=	燃料体の形と燃料物性値のオプション N ≥ 0 円筒型燃料を指定する N < 0 平板型燃料を指定する Nの絶対値は、燃料Iの物性値番号 (GROUP. 8. 2) に一致する。
I	=	ロッドの認識番号
DR	=	ロッドの外径(in)。ロッドのまわりにクラッドがあれば、DRはクラッドの外径である。
RADIAL	=	ロッドIのロッド平均出力に対する径方向出力ピーキング係数 (GROUP. 11)
LR	=	ロッドIのまわりのサブチャンネルの認識番号 6個のサブチャンネルについて読み込む
PHI	=	隣接するサブチャンネルにインプットする総ロッド出力の割合 (すなわち、LRで認識されるサブチャンネルに面するロッドの外周径の割合)

GROUP. 8. 2	[KFUEL(I), CFUEL(I), RFUEL(I), DFUEL(I), KCLAD(I), CCLAD(I), RCLAD(I), TCLAD(I), HGAP(I), I=1, N=4] Format (9E 8. 2)	
	オプション・インプット N4>0かつNC>0で入力する	
	物質の物性値、熱特性を指定するための、N4個の物質に相当するN4枚のカードを読む。各燃料棒は、1つ以上のこれらの物性から成り立つ。	
KFUEL	=	燃料の熱伝導率(Btu/hr · ft · F)
CFUEL	=	燃料の比熱(Btu/lb · F)
RFUEL	=	燃料の密度(lb /ft ³)
DFUEL	=	燃料の直径(in)
KCLAD	=	クラッドの熱伝導率(Btu/hr · ft · F)
CCLAD	=	クラッドの比熱(Btu/lb · F)
RCLAD	=	クラッドの密度(lb /ft ³)
TCLAD	=	クラッドの厚さ(in)
HGAP	=	燃料-クラッド間のギャップコンダクタンス係数(Btu/hr · ft ² · F)

<u>カード・ラベル</u>	<u>変数名</u>	<u>フォーマットと説明</u>
GROUP.9	GROUP.9	計算上の変数 Format (10I6)
	N1	= NSKIPX アウトプット・プリント・オプション N1=0,1 すべての軸方向レベルでプリントする N1>1 N1個毎の軸方向レベルでプリントする
	N2	= NSKIPT アウトプット・プリント・オプション N2=0,1 すべてのタイム・ステップでプリントする N2>1 N2個毎のタイム・ステップでプリントする
	N3	= KDEBUG 各計算値のデバッグ用オプション N3=0 デバッグとアウトプットしない N3=1 デバッグをアウトプットする N3=2
	N4	= ダミー
	N5	= ダミー
	N6	= JSTART CHF 計算軸方向始め
	N7	= JEND CHF 計算軸方向終り

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 9. 1	Z, TTIME, FERROR, KIJ, SL, FTM, THETA, DAMPNG	Format (8E10.2)
	Z	= 軸方向の長さの総計(in)
	TTIME	= 過渡状態計算の時間(sec)
	FERROR	= 軸方向流量の反復の許容誤差 デフォルト値は 0.001である
	KIJ	= クロスフロー抵抗係数 デフォルト値は 0.5
	SL	= 横方向モメンタム・パラメータ デフォルト値は 0.5
	FTM	= 乱流モメンタム・ファクター デフォルト値は 0.0
	THETA	= bundle Orientation (度) ブランクまたは0は、垂直で、そうでないときは、垂直を基準に離れている最も近い角度を入力
	DAMPNG	= iterative SP term の緩和係数 $SP(I, J)^N = DAMPNG * SP(I, J)^N + (1-DAMPNG) * SP(I, J)^{N-1}$ ただしN と N-1はそれぞれ現在と前回の反復である デフォルト値は 0.8
GROUP. 9. 2	NDX, NDT, NTRIES	Format (3I5)
	NDX	= 軸方向分割数
	NDT	= 許容される時間ステップの総数
	NTRIES	= アウター・イタレーションの最大反復回数 FERRORには無関係である。 デフォルト値は20

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 10	GROUP. 10 乱流ミキシング相関	Format (10I6)
	N1	= NSCBC 单相乱流ミキシングのオプション 乱流クロスフロー W' の相関式は、以下に示す形式の方程式が可能である。 $N1=0 \quad W'_K = ABETA * (S_K G)$ $N1=1 \quad W'_K = ABETA * (Re)^{BBETA} * (S_K G)$ $N1=2 \quad W'_K = ABETA * (Re)^{BBETA} * (DG)$ $N1=3 \quad W'_K = ABETA * (Re)^{BBETA} * (S_K / Z_K) (DG)$ ここで定数ABETA とBBETA(GROUP. 10.1) は、N1によって選択される方程式に適用される。
	N2	= NBCC 2相流ミキシングのためのオプション N2=0,1 サブクール状態と同一 N2>1 Betaとスチーム・クオリティをテーブル形式でN2個のペアのデータを入力する。
	N3	= J5 radial thermal conduction mixingのためのオプション N3=0 thermal conductionはない N3=1 径方向熱伝導パラメータ G_K を読む
	N4	= MIXK GROUP. 10.1の読み込みのためのオプション

カード・ラベル	変 数 名	フォーマットと説明
GROUP. 10.1	<u>ABETA, BBETA</u> ……N4=0のとき または <u>ABET(K), BBET(K), K=1, NK</u> ……N4=1, N1 ≤ 0 のとき	Format (8E10.2) ABETA, BBETA = 選択された乱流ミキシング相関の定数係数 N1=0のとき、BBETA はブランク
GROUP. 10.2	<u>(XQUAL(I), BX(I), I=1, N2)</u> Format (8E10.2)	オプション・インプットN2>1で入力 ミキシングBetaとスチームクオリティの値をテーブル形式で読み込む XQUAL = スチームクオリティ BX = スチームクオリティに相当するミキシングBeta
GROUP. 10.3	<u>GK</u> Format (E 10.2)	オプション・インプットN3>1で入力 GK = 径方向熱伝導パラメータ

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 11	GROUP. 11	運転条件と過渡状態の定義 Format (10I6)
	N1 = IH	<p>入口エンタルピーと温度を指定するオプション</p> <p>N1=0 HIN(GROUP. 11. 1) は入口エンタルピー</p> <p>N1=1 HIN は入口温度</p> <p>N1=2 各サブチャンネルに入口エンタルピーを読む</p> <p>N1=3 各サブチャンネルに入口温度を読む</p>
	N2 = IG	<p>入口質量流束を指定するオプション</p> <p>N2=0 GIN(GROUP. 11. 1) は、各サブチャンネルの入口質量流束</p> <p>N2=1 GIN は平均バンドル質量流束</p> <p>ただし等しいDP/DX を与えるために、サブチャンネル流量は、第1 axial nodeを横切って分離する</p> <p>N2=2 GIN は平均バンドル質量流束</p> <p>ただし流量は、GROUP. 11. 3で入力する flow fraction により分離される</p>
	N3 =	<p>システム圧力のための過渡状態の定義</p> <p>システム圧力と時間をNP個のペアまたはテーブル値で読み込む</p>
	N4 =	<p>入口エンタルピーと温度のための過渡状態の定義</p> <p>入口のH またはT factorと時間をNH個のペアまたはテーブル値で読み込む</p>
	N5 =	<p>入口質量流束または圧損のための過渡状態の定義</p> <p>質量流束またはΔPと時間を、NG個のペアまたはテーブル値で読み込む</p>
	N6 =	<p>平均熱流束のための過渡状態の定義</p> <p>熱流束と時間をNQ個のペアまたはテーブル値で読み込む</p>

(注) ただしGROUP. 1 のNLOOP=1 の場合には、N1, N2の指定は初期値の定義に用いるだけである。

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 11. 1	<u>PEXIT, HIN, GIN, AFLUX</u>	Format (4F10.0)
	運転条件	
	PEXIT	= システム圧力(psia)
	HIN	= 入口エンタルピー(Btu/lb) または入口温度(F) N1に依存する HIN<0 ならば入口エンタルピーは、HIN の絶対 値か、flowが逆転した場合前に計算された第1 nodeのエンタルピーのどちらかである。
	GIN	= N2オプションで分配された、入口質量流束 流路面積はGROUP4.1のAC (MBtu/hr · ft ²)
	AFLUX	= 平均熱流束(MBTU/hr · ft ²)
	(注)	HIN, GIN は、GROUP. 1 でNLOOP=1 のときは初期値
GROUP. 11. 2	<u>(HINLET(I), I=1, NCHANL)</u>	Format (8E10.2)
	オプション・インプット	N1=2, 3で入力 入口エンタルピーまたは入口温度
	HINLET	= 各サブチャンネルの入口エンタルピー(N1=2)ま たは入口温度(N1=3) 各サブチャンネルについて、1個の値を読む
GROUP. 11. 3	<u>(FSPLIT(I), I=1, NCHNL)</u>	Format (8E10.2)
	オプション・インプット	N2>2で入力 入口流量
	FSPLIT	= 各サブチャンネルの入口流量(F(I)/Fav)
GROUP. 11. 4	<u>(YP(I), FP(I), I=1, N3)</u>	Format (8E10.2)
	オプション・インプット	N3>1で入力 過渡状態圧力テーブル
	YP	= ファクターが適用されるときに過渡状態の時 間(sec)
	FP	= 過渡状態時YPにおける定常状態のシステム圧力 の割合

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 11.5	<u>(YH(I), FH(I), I=1, N4)</u>	Format (8E10.2) オプション・インプット N4>1で入力 過渡状態エンタルピーまたは温度のテーブル YH = ファクターが適用されるとき の過渡状態の時間(sec) FH = 過渡状態時YHにおける入口 エンタルピーの割合 (N1=0 または2)または入口温度の割合 (N1=1 または3)
GROUP. 11.6	<u>(YG(I), FG(I), I=1, N5)</u>	Format (8E10.2) オプション・インプット N5>1で入力 過渡状態入口流量または圧損境界条件のテーブル YG = ファクターが適用されるとき の過渡状態の時間(sec) FG = 過渡状態時YGにおける定常状態 の入口流量の割合
GROUP. 11.7	<u>(YQ(I), FQ(I), I=1, N6)</u>	Format (8E10.2) オプション・インプット N6>1で入力 過渡状態熱流束テーブル YQ = ファクターが適用されるとき の過渡状態の時間(sec) FQ = 過渡状態時YQにおける定常状態 の熱流束の割合

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 12	GROUP. 12	計算のアウトプット・オプション Format (8E10.2)
N1 =	NOUT	<p>プリント・オプション</p> <p>N1=0 サブチャンネルのデータのみ</p> <p>N1=1 サブチャンネルのデータとクロスフローのみ</p> <p>N1=2 サブチャンネルのデータと燃料棒の温度のみ</p> <p>N1=3 サブチャンネルのデータとクロスフローと燃料棒の温度</p>
	N2 =	<p>NPCHAN</p> <p>サブチャンネルのデータのプリントアウトに関するオプション</p> <p>N2=0 すべてのサブチャンネルのデータ</p> <p>N2>0 プリントするサブチャンネルの番号の数N2を読み込む</p>
	N3 =	<p>NPROD</p> <p>燃料棒熱流束と温度のプリントアウトに関するオプション</p> <p>N3=0 すべてのロッドのデータ ただしN1=2,3のときのみ</p> <p>N3>0 プリントするロッドの番号の数N3を読み込む</p> <p>NCHF(GROUP.8)>0 ならばCHF データもロッドデータといっしょにプリントされる</p>
	N4 =	<p>NPNODE</p> <p>N3で指定されたすべてのロッドの燃料内部nodeの温度のプリントアウトに関するオプション</p> <p>オプションは燃料モデル(GROUP.8)を用いてロッド内部温度を計算した場合のみ適用される</p> <p>N4=0 ロッド中心線とロッド表面とクラッド表面の温度をプリントする</p> <p>N4=3~7 N4個の等間隔のロッドの内部温度をクラッド表面温度といっしょにプリントする</p>

カード・ラベル	変数名	フォーマットと説明
GROUP. 12.1	<u>(PRINTC(I), I=1, N2)</u> Format (16I5)	オプション・インプット N2>0で入力 PRINTC = データをプリントするN2個のサブチャンネルの 番号を入力する N2=0のとき、すべてのサブチャンネルをプリン トする
GROUP. 12.2	<u>(PRINTR(I), I=1, N3)</u> Format (16I5)	オプション・インプット N3>0で入力 PRINTR = 熱流束と温度をプリントするN3個のロッドの番 号を入力する ただしN1=2, 3のときのみ
GROUP. 12.3	<u>(PRINTN(I), I=1, N4)</u> Format (16I5)	オプション・インプット N4>0で入力 PRINTN = 燃料ペレット内の温度分布のプリント・オプシ ョン

以下のパラメータは、NAMELIST文により入力する

変数名	内 容	デフォルト値
HCOREY	炉心の高さ (m)	
HPLENY	プレナム長 (cm)	
RDPIT	ピ ッ チ (mm)	
AXPIT	軸方向ピッチ	
FDIA	ピン直径 (mm)	
QTOTAL	原子炉出力 (MWt)	3411.0
WRATIO	炉心有効流量割合	1.0
TOUT	出口温度 (°C)	325.0
HYDE	炉心部等価直径 (cm)	
ATTL	炉心部流路面積 (cm ²)	
FLOW	一次系冷却材流量 initial guess	60.1×10^6
FLFACT	流量配分のパラメータ	1.0
ITRMAX	一次系流量計算の反復回数	100
EPSF	流量の収束判定因子	0.0005
AA1		-23.163
	ポンプ特性 ($H(m) = AA1 \times Q(m^3/s) + AA2$)	
AA2		192.69
COEFIN	炉心入口損失係数	1.2
HRO	基準 PWR の炉心以外の圧損 (m) ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)	42.0
FLOWO	基準 PWR の一次系流量 (kg/hr)	60.1×10^6
TINO	基準 PWR の入口温度 (°C)	289=552.2 °F
TAVO	基準 PWR の炉心平均温度 (°C)	307=584.6 °F
LOOP	ループ数	4

(注) チャンネル I の入口流量は次のように計算される。

$$\frac{\text{FLOW} \times \text{FLFACT}}{\text{ATTL}} \times (\text{AN}(I) - \text{AFIN}(I))$$

HYDE は炉心の平均圧損の評価に使用するだけで、他の計算には関係ない。

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER ██████████,SA.FUJII,0431.01
  I.4W.2C.2
  T.3
  OPTP PASSWORD=████,MSGCLASS=R
// EXEC LMGO,LM='J3803.¥DATAP'
//FT10F001 DD UNIT=TSSWK,DISP=(,PASS),DSN=&&DATAP,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200),SPACE=(TRK,(2,2))
  1000
  999      1
(88.7.2)2BUNDLE/LUMPED/K=.5/SL=**/FT=.0/GK=.0/P=11.1/D=9.5/L=2.23/STEAM/Q-H/
  1 150 0 0 1 1
  2 0 0 0 1
0.0      0.0
0.0
  3 1 -1
  9 1 1 0 0 2 36
127.165 2.0 0.001 0.5 0.08 0.00 0.0 0.0
  50 0 100
  4 2 2
5 1 17.9 395.1 352.5 1.1897 113.4
  2 0.62992 8.1102
5 2 17.9 395.1 352.5 1.1897 113.4
  7 1 0 0
7.4803 .37402
  1 .52632
  1 1
  8 2 2 7 1 3
  1.374016 1.3 1 300.0
  2.374016 0.7 2 300.0
  2.0 .08 640.0 .502 8.8 .076 405. .030 1000.
  10 0 0 1 0
0.02
0.0
  11 0 0 0 0 8 0
2261.512 546.72 3.52051 0.1795
  0.0 1.0 0.5 1.0 1.0 1.5 1.0
  2.0 1.0 3.0 1.0 4.0 1.0 50. 1.0
  12 3 0 0
  0
¥COBRA
  QTOTAL=3411.0,
  WRATIO=0.95,
  TOUT =325.0,
  HCORE¥=2.23,
  HPLEN¥=100.0,
  RPITCH=11.1,
  AXPIT =20.0,
  FDIA =9.5,
  ATTL =32453.46,
  HYDE =0.4604,
  FLOW =60.1E+6,
  EPSF = 0.0002,
  ITRMAX=500,
¥END
  0
/*
// EXEC FORT77,A='NOPRINT'
//SYSIN DD DSN=J2350.¥STEAMP1.FORT77,DISP=OLD
// EXEC FORT77,SO='J2350.¥COBRA3H',A='ELM(*)',NOPRINT',DISP=MOD
// EXEC LKEDIT77,LM='J3803.¥ASMLK'
// EXEC GO
//FT05F001 DD DSN=&&DATAP,DISP=(OLD,DELETE)
//FT05F001 DD DSN=J3803.¥WPROPA.DATA(WATER2),DISP=SHR
++
//

```

Fig.A4.1 Sample JCL and data of COBRA-HCLWR code