

高性能制御棒の検討

FBR大型炉の設計主要目に関する研究

1988年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高性能制御棒の検討

FBR大型炉の設計主要目に関する研究

菰田成一* 池上哲雄** 水野朋保** 鈴木惣十**
金城勝哉* 中西征二* 谷山洋*

要 旨

61年度レファレンス炉心をベースとし、長寿命化、および出口冷却材温度高温化の観点で好適な、高性能制御棒仕様を明らかにするとともに、その性能を把握することを目的とした。

制御棒当たり吸収ピン本数、ピン配列形状、 B_4C ペレットと被覆管間のギャップ幅、スベアワイヤの径や巻付けピッチ等をパラメータとし、ACMI発生後の継続照射時の、被覆管フープ応力やピンバンドルと保護管の寸法干渉量(BDI)、また寿命初期の被覆管最高温度を評価した。

ピン本数として37本程度を選定するならば、製作時のペレット-被覆管間直径ギャップ幅を0.8mm程度まで広げることができ、照射後約3年でACMIが開始する。さらに、約1年継続照射をすると、BDIはワイヤ径1本分に達する。この間、被覆管のフープ応力は、照射クリープの寄与により、過大な値とならないが、炉停止時および炉外取出時には急増するとの結果が得られた。また、同芯円状配列の37本バンドルは、正三角形格子状配列の31本バンドルと比べて、出口冷却材温度高温化の観点で有利との結果が得られた。

結論として、同芯円状配列の37本バンドルを採用することで、出口冷却材温度約450°Cの達成見通しを得た。また、制御棒寿命を評価するためには、被覆管の照射クリープ特性明確化の必要性のあることが分かった。

* 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

** (現)日本原子力発電、高速炉開発部

Study on Advanced Control Rod

Study on the Main Design Parameters of Large Scale FBR Core Characteristics

Seiichi Komoda*, Tetsuo Ikegami**, Tomoyasu Mizuno**, Soju Suzuki**,
Katsuya Kinjo*, Seiji Nakanishi* and Hiroshi Taniyama*

Abstract

The aims of this work are to give the specifications of the control rod having a good performance under a long term irradiation and a high temperature condition of outlet coolant, and also to get a rough estimation of the allowable maximum irradiation period and outlet temperature at the base of the reference core designed in the year before last.

The hoop stress of a cladding tube and the dimension of interference between an absorber pin bundle and an inner duct tube surrounding the bundle (BDI) are evaluated in the period after the time that ACMI begins. In addition, the maximum temperature of a cladding tube is evaluated at the beginning stage of irradiation. These evaluations are done for the several specifications which change in the number of pins, the arrangement of pins, the gap width between B_4C pellet and cladding tube, the spacer wire thickness or wrapping pitch, etc.

It is found that a diametral gap width between pellet and cladding tube may be expanded to about 0.8 mm if a 37 pins bundle is selected, and that ACMI begins at three years irradiation and BDI reaches the magnitude of wire thickness at additional one-year irradiation if that width of 0.8 mm is selected. Through the additional irradiation, the hoop stress of a cladding tube does not exceed the allowable maximum value owing to an irradiation creep, but it increases rapidly at a reactor shutdown or when the control rod is removed from the core. It is also found that the 37 pins bundle whose pins are located on concentric circles is superior in view of making an coolant outlet temperature high to the 31 pins bundle whose pins are located with a regular triangle lattice pattern.

As a conclusion, the prospect is obtained that about 450 °C is realized as an coolant outlet temperature by selecting the 37 pins bundle whose pins are located on concentric circles. But it is found that the irradiation creep behavior of a cladding tube must be clarified in order to evaluate the control rod life.

*Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center

**Fast Reactor Development Division, Japan Atomic Power Company

目 次

1. 概要	1
2. 検討方法	3
3. 長寿命化の検討	9
3.1 解析条件	9
3.2 解析結果	10
4. 出口冷却材温度高温化の検討	20
4.1 解析条件	20
4.2 解析結果	21
5. まとめ	29
6. 今後の検討課題	30
参考文献	32
謝辞	33
付録A 長寿命化の検討に関連して実施した解析結果の詳細	34
付録B 出口冷却材温度高温化の検討に関連して実施した解析結果の詳細	54
付録C 周辺細径ワイヤ仕様の検討	65

表 リ ス ト

第3.1表	寸法仕様とその設定根拠-----	13
第3.2表	評価対象主系統棒と原型炉粗調整棒の仕様比較-----	14
第3.3表	核熱条件と、その設定根拠-----	15
第3.4表	B ₄ C反応率軸方向分布-----	16
第3.5表	バイパス部Naの γ 発熱量軸方向分布-----	16
第3.6表	ペレット最高温度評価用ホットスポット係数-----	16
第3.7表	被覆管フープ応力とACMI開始時期-----	17
第3.8表	オーステナイト鋼の降伏応力(照射材)-----	17
第4.1表	寸法仕様とその設定根拠-----	23
第4.2表	SCANNERコードによる解析条件と解析結果-----	24
第4.3表	VORTEXコードによる解析条件と解析結果-----	25
第4.4表	被覆管内面最高温度評価用工学的安全係数-----	26
第4.5表	被覆管内面温度を650°C以下とするために必要な最小流量と、 その場合のサイクル末期冷却材出口温度の評価結果-----	26
第4.6表	被覆管周方向最大温度差-----	27
付表A-1	過出力時ペレット中心最高温度ホットスポット値評価結果-----	36
付表A-2	吸収体部線出力軸方向分布と平均値(ピン1本当たり)-----	37
付表A-3	吸収体部線出力軸方向分布と平均値(最大発熱ピンについて)-----	38
付表A-4	ペレット径および ¹⁰ B濃縮度計算結果-----	39
付表A-5	被覆管外表面熱伝達率、ギャップコンダクタンス、ペレット熱伝導率-----	39
付表A-6	B ₄ Cペレット反応率、燃焼度、 ¹⁰ B残存率(ペレットスタック下端位置)-----	40
付表A-7	バンドル流量の全流量に対する割合-----	41
付表A-8	S. Aokiの式による渦拡散率比-----	41
付表A-9	流速(cm/sec) & レイノルズ数-----	41
付表A-10	ペレットスタックと被覆管の伸び差評価結果(EOL)-----	42
付表A-11	案内管出口冷却材温度評価結果-----	42
付表A-12	B ₄ Cペレット反応率、燃焼度、および ¹⁰ B残存率 (ワイヤ径:Φ1.2mm、ペレットと被覆管の直径ギャップ幅)-----	43
付表A-13	Na侵入量(高さ)-----	43
付表C-1	周辺細径ワイヤ仕様の検討における解析条件と解析結果-----	66

図 リ ス ト

第2.1図	高性能制御棒の設計検討の方法	5
第2.2図	SCANNERコードの主要機能	6
第2.3図	VORTEXコードの特徴	7
第2.4図	VORTEXコードの適用範囲	7
第2.5図	内層19本が正三角形格子状配列の37本バンドル	7
第2.6図	同芯円状配列の37本バンドル	8
第2.7図	正三角形格子状配列の31本バンドル	8
第3.1図	ペレット温度のギャップ巾依存性	18
第3.2図	BDI量のギャップ巾依存性	19
第4.1図	同芯円状配列の37本バンドルにおける径方向出力分布	27
第4.2図	正三角形格子状配列の31本バンドルにおける径方向出力分布	28
付図A-1	ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号 (同芯円状配列37本バンドル)	44
付図A-2	冷却材温度軸方向分布(同芯円状配列37本バンドル)	45
付図A-3	SUS温度軸方向分布(同芯円状配列37本バンドル)	46
付図A-4	サブチャンネル軸方向質量流量の軸方向分布 (同芯円状配列37本バンドル)	47
付図A-5	サブチャンネル間横方向質量流量の軸方向分布 (同芯円状配列37本バンドル)	48
付図A-6	ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号 (内層19本正三角形配列37本バンドル)	49
付図A-7	冷却材温度軸方向分布(内層19本正三角形配列37本バンドル)	50
付図A-8	SUS温度軸方向分布(内層19本正三角形配列37本バンドル)	51
付図A-9	サブチャンネル軸方向質量流量の軸方向分布 (内層19本正三角形配列37本バンドル)	52
付図A-10	サブチャンネル間横方向質量流量の軸方向分布 (内層19本正三角形配列37本バンドル)	53

付図B-1	ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号 (同芯円状配列37本バンドル)-----	55
付図B-2	第2層ピン(#2)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (同芯円状配列37本バンドル)-----	56
付図B-3	第3層ピン(#8)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (同芯円状配列37本バンドル)-----	57
付図B-4	第4層ピン(#20)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (同芯円状配列37本バンドル)-----	58
付図B-5	冷却材最高温度高さ位置における横方向流の方向と大きさ (同芯円状配列37本バンドル)-----	59
付図B-6	ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号 (正三角形配列31本バンドル)-----	60
付図B-7	第2層ピン(#2)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (正三角形配列31本バンドル)-----	61
付図B-8	第3層ピン(#8)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (正三角形配列31本バンドル)-----	62
付図B-9	第4層ピン(#20)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布 (正三角形配列31本バンドル)-----	63
付図B-10	冷却材最高温度高さ位置における横方向流の方向と大きさ (正三角形配列31本バンドル)-----	64

1. 概 要

FBR大型炉の制御棒の設計研究では、3年以上の制御棒寿命の達成(プラント稼働率の向上、必要制御棒総数の削減、使用前および使用済制御棒の保管用スペースの削減、廃棄物の物量削減)と、制御棒出口冷却材温度の高温化(炉心上部機構のサーマルストライピング緩和)を主要課題としている。また、大型炉における燃料集合体当たり燃料ピン本数増大に呼応して、制御棒当たりの吸収ピン本数の増加が必要であるが、吸収ピン本数およびその配列形状等、制御棒主要仕様を設定するためには、上記課題の検討が不可欠である。

大型炉に関する61年度設計研究においては、正三角形格子状に配列した55本バンドルの概念を採用し、制御棒寿命3年の達成が可能であり、隣接集合体間の冷却材出口温度差をノミナルベースで120℃以下に収める流配が可能との見通しを得ている⁽¹⁾。この寿命3年の達成は、レファレンス炉心の燃焼反応度が小さいという特長に起因するものであり、制御棒設計手法の合理化によるものではなく、制御棒使用限界は、従来設計手法を踏襲し、ペレット・被覆管間機械的相互作用(以下ACMI)の発生までとしている。流配設計においては、吸収ピン被覆管最高温度の詳細な解析評価が未実施であり、制御棒集合体当たり必要最小流量は、主系統棒で暫定値4.5kg/secを採用している。また、被覆管最高温度の詳細な解析評価が未実施なので、正三角形格子状配列55本バンドルを採用することの妥当性根拠が充分でない。

ところで、制御棒設計手法合理化により長寿命化を達成するための道具として、ACMI発生時の被覆管応力を解析評価するためのコードCORAL⁽²⁾が開発されてきたが、61年度設計研究において、『常陽』MK-I、II実機制御棒PIEデータに基づき、検証が行われ⁽³⁾、設計研究への適用が可能となった。また、制御棒出口冷却材温度の高温化を検討するための道具として、バンドル部とバイパス部(保護管と案内管の間のギャップ部)の流量配分比等を解析評価するためのコードSCANNER⁽⁴⁾、また種々の吸収ピンバンドルに適用可能な大型バンドル熱流力特性解析用コードVORTEX-III⁽⁵⁾を、本検討の過程で開発整備した。

本研究の目的は、制御棒長寿命化と制御棒出口冷却材温度の高温化の観点で好適な制御棒仕様を明らかにするとともに、その性能を把握することである。

62年度の制御棒設計研究では、Phase Iとして、ワイヤ径をパラメータとした長寿命化の検討を行い、その検討結果より、ワイヤ径をΦ1.2mmに設定して、制御棒出口冷却材温度の高温化の観点における37本バンドルの配列最適化の検討を、引続き実施した。したがって、長寿

命化に重点を置いた検討となった。

その後、Phase IIとして、63年度初めにかけて、制御棒出口冷却材温度の高温化に着目し、ワイヤ径やワイヤ巻付けピッチの最適化検討と、37本同芯円状配列バンドルと31本正三角形格子状配列の優劣比較を実施した。

第3章『長寿命化の検討』では、Phase Iにおける解析結果のうち、ワイヤ径として $\Phi 1.2\text{mm}$ のもの、また37本バンドルとして同芯円状配列のものだけを取り上げた。ワイヤ径 $\Phi 1.5\text{mm}$ を含めた解析結果の詳細と、内層19本を正三角形格子状に配列した37本バンドルを含めた解析結果の詳細は、付録Aに示した。

第4章『出口冷却材温度高温化の検討』では、Phase IIとして実施の解析結果のうち、主要な結果を示し、付録Bに解析結果の詳細(プロッター図)を収録した。

また、原型炉ブランケット燃料集合体において採用されている周辺細径ワイヤ仕様概念を、制御棒吸収ピンバンドルへ採用することの有効性評価結果を付録Cに収録した。

2. 検討方法

61年度レファレンス炉心⁽¹⁾における外側主系統棒を解析対象として想定し、3種類のコード **SCANNER**⁽⁴⁾、**VORTEX**⁽⁵⁾、および **CORAL**⁽²⁾を用いて、第2.1図に示した検討方法にて、高性能制御棒の設計検討を実施した。

SCANNERコードは、61年度より開発を開始し、62年度に完成したもので、その主要な機能を第2.2図に示した。

SCANNERコードでは、制御棒当たり¹⁰B装荷量一定条件にて、①過出力時ペレット中心温度ホットスポット値、および②通常運転時、寿命末期炉停止時、および炉外取り出し時におけるACMIに起因するBDI量の、ペレット・被覆管間製作時ギャップ巾への依存性を評価することが可能であり、長寿命制御棒の設計検討に有用である。但し、ACMIに起因する被覆管応力は、被覆管の照射クリープを無視した過度に保守的な条件にて算出されるので、被覆管応力評価コード**CORAL**にて、別途評価した。

また、制御棒の冷却材出口温度を、寿命中を通して追うことができるので、出口冷却材温度高温化の検討においても有用である。但し、この場合においても、次に述べる理由のため、制御棒熱特性解析コード**VORTEX**による被覆管最高温度ホットスポット値の評価も、別途実施する必要がある。**SCANNER**コードでは、バンドル部内の流量分布やサブチャンネル間の熱移動を一切考慮していないためである。尚、制御棒熱特性解析コード**VORTEX**の入力条件として必要な、①バンドル/バイパス流量配分比、②バンドル部とバイパス部(アニュラス部)のそれぞれにおける渦拡散率比、および③隣接燃料集合体よりの入熱量は、**SCANNER**コードにて評価した。

SCANNERコードにおいては、一定のB₄Cペレット仕様条件のもとでの、新制御棒の挿入量毎反応率分布計算結果を入力データとするが、コード内でサーチしたB₄Cペレット仕様(ペレット径、¹⁰B濃縮度)条件での、各時期における反応率分布に換算した後、ペレットの発熱量やスエリング量が計算される。尚、その際には、入力で指定する挿入量履歴に基づき、燃焼に伴う¹⁰Bの減損が考慮される。一方、高速中性子束分布については、入力データとして与える核計算結果が、案内管に対してはそのまま、また保護管および吸収ピンに対しては制御棒の挿入量を考慮して、それぞれ使用され、構造材のスエリング量が計算される。

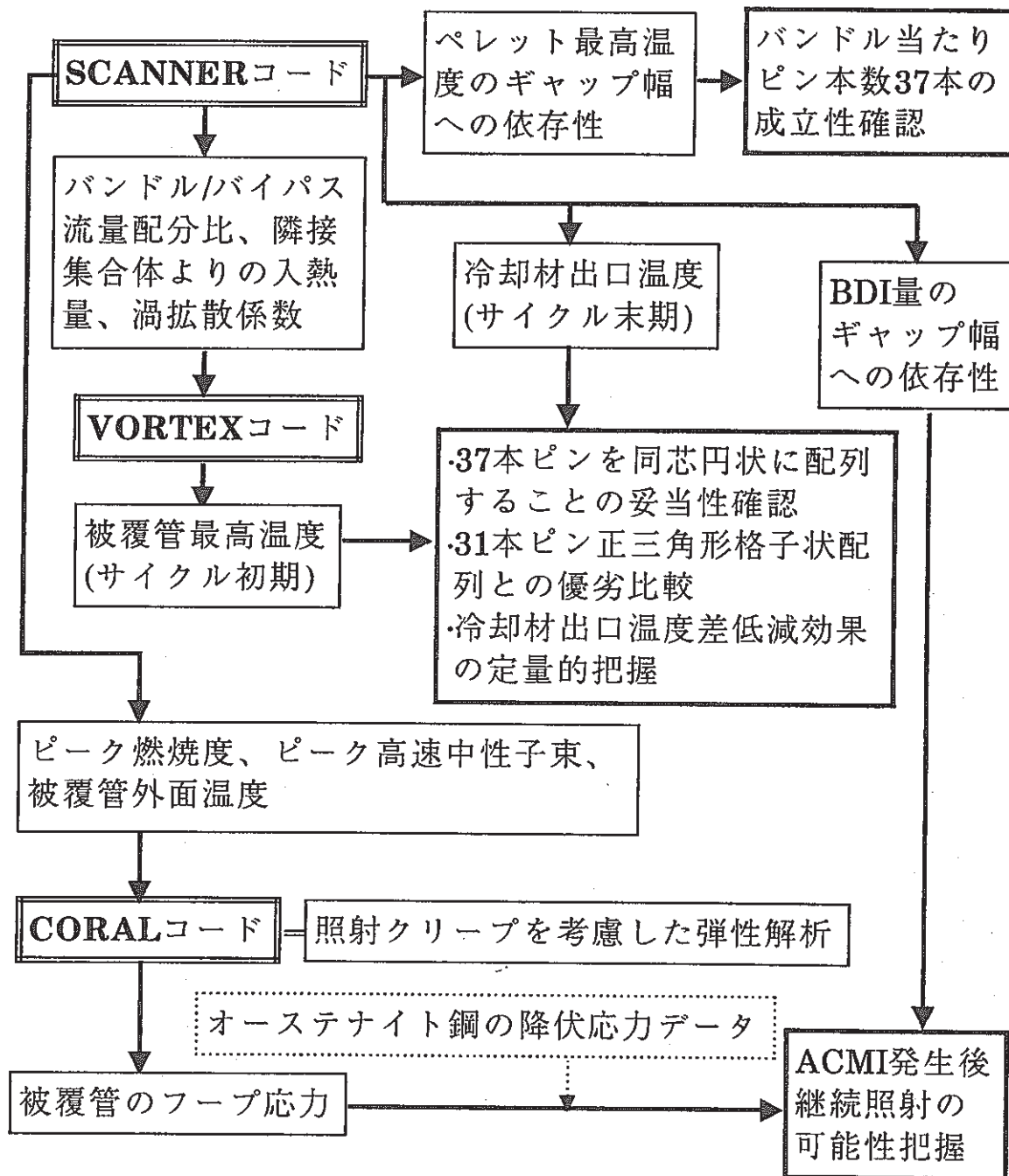
保護管より上部および下部、またバイパス部におけるNaの γ 発熱量は軸方向分布として、ま

た、被覆管およびスパーサワイヤの γ 発熱量は、ペレット発熱割合データの形で、それぞれ与えることが可能であるが、保護管、案内管、およびバンドル部Naの γ 発熱は考慮できない。したがって、この特徴に充分留意して入力データを作成した。

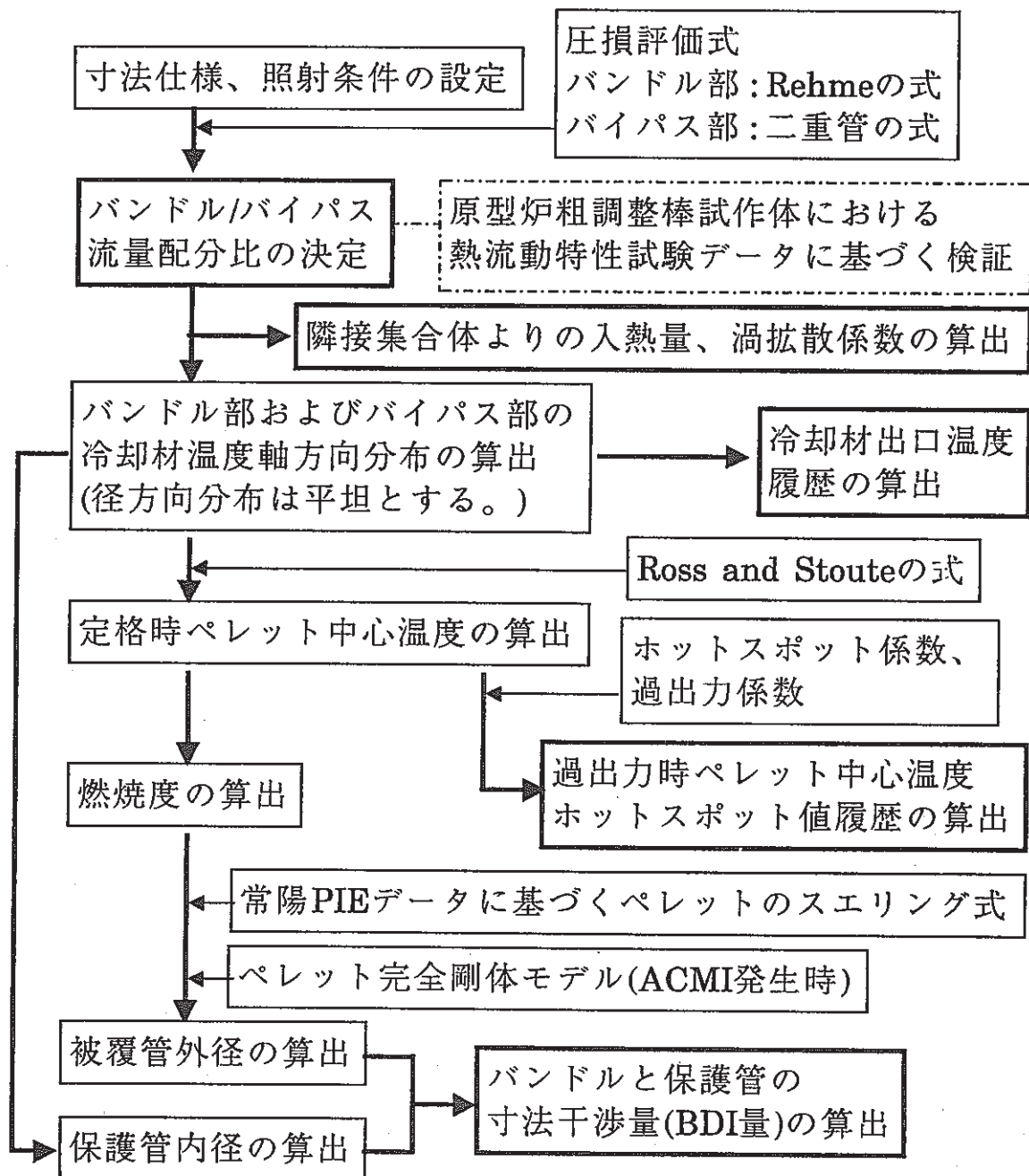
上述したように、**SCANNER**コードでは、隣接燃料集合体よりの入熱量(案内管を通しての熱移動量)の計算が可能であり、保護管を通しての熱移動も考慮出来る。尚、隣接集合体よりの入熱量を算出するため、隣接集合体の寸法条件、また発熱および除熱条件を入力する必要がある。

制御棒熱特性解析コード**VORTEX**は、これまで『常陽』や『もんじゅ』の制御棒の熱特性解析に使用されてきたコードであり、第2.3図にその特徴を示した。解析手法に関する修正は一切行わず、第2.4図に示したような適用範囲拡張のみを行った新バージョン**VORTEX-Ⅲ**を、本検討においては使用した。

大型炉における制御棒当たりピン本数は、燃料集合体の大型化に伴い、19本を越えるものと予想される。旧バージョン⁽⁶⁾、⁽⁷⁾においても、19本を越える37本バンドル(cf. 第2.5図)の取扱いは可能であるが、その配列ではバンドル内での流量分布が不適切で、バンドル中央部における冷却性の悪いことが予測された。そこで、四角形状サブチャンネルが周辺部だけでなく、中央部寄りにも混在する同芯円状37本バンドル(cf. 第2.6図)への適用も可能とした。また、海外炉(スーパー・フェニックスの主系統棒)において、採用候補とされている正三角形格子状31本バンドル(cf. 第2.7図)への適用も可能とした。



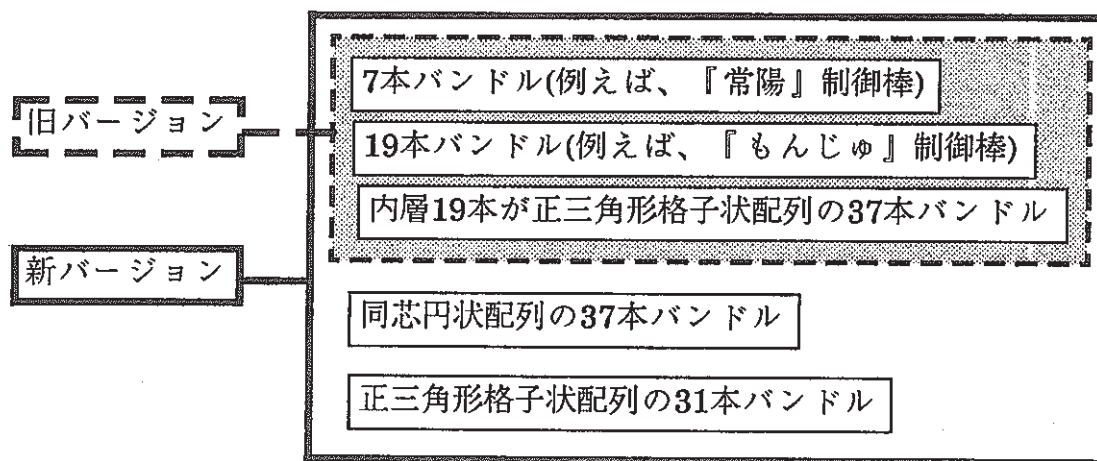
第2.1図 高性能制御棒の設計検討の方法



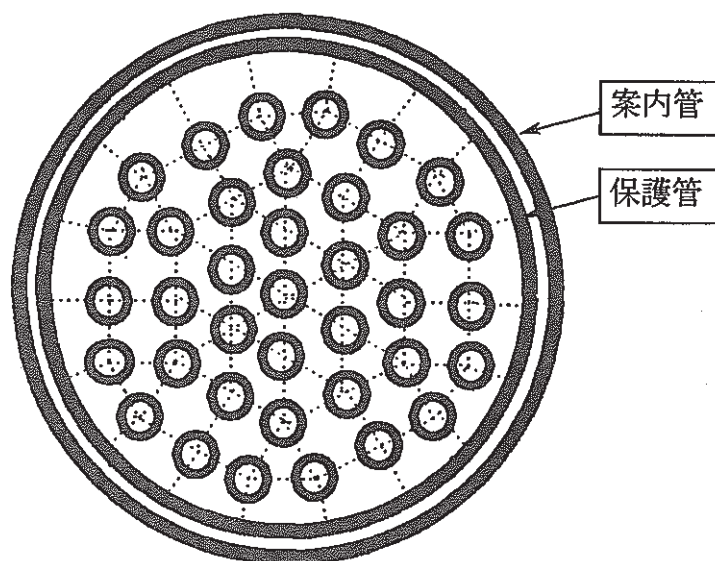
第2.2図 SCANNERコードの主要機能

- サブチャンネル解析手法
- cosine 関数でモデル化した偏向流
- 冷却材圧力差による横向流
- Rowe式でモデル化した乱流混合
- 保護管を通しての熱移動を考慮
- 構造材および冷却材の γ 発熱条件設定が可能
- 案内管外壁面熱流束(隣接集合体よりの入熱量)条件設定が可能

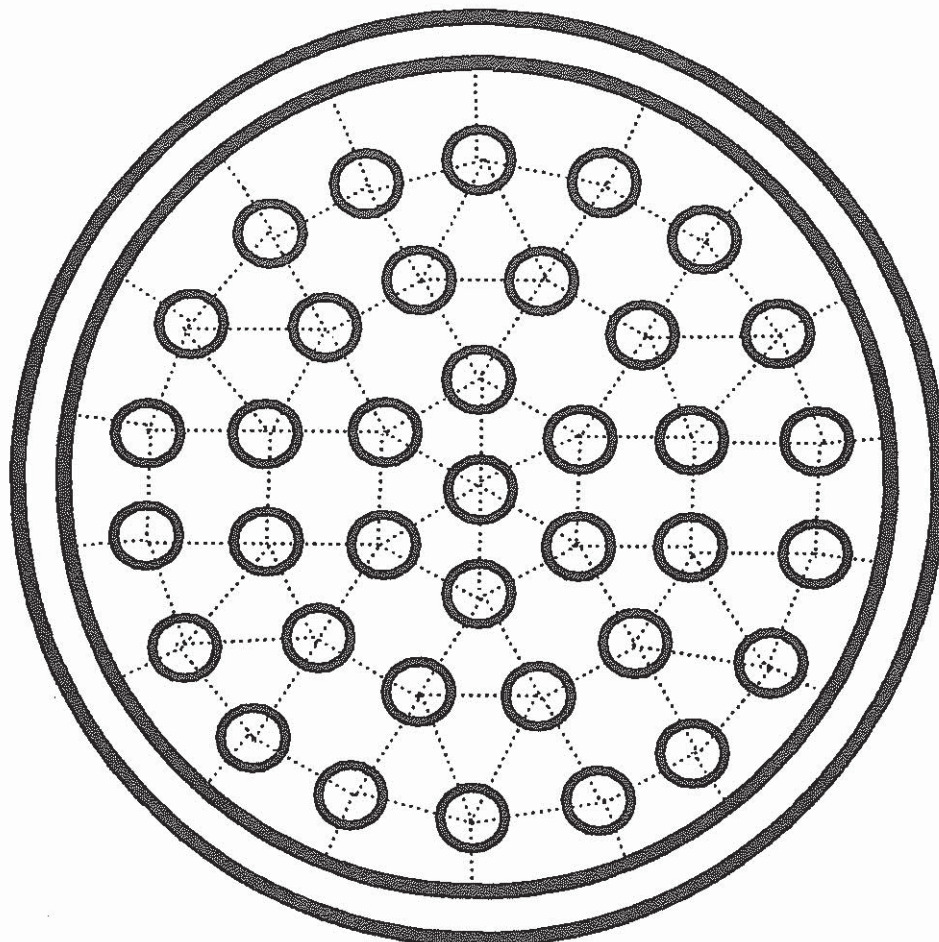
第2.3図 VORTEXコードの特徴



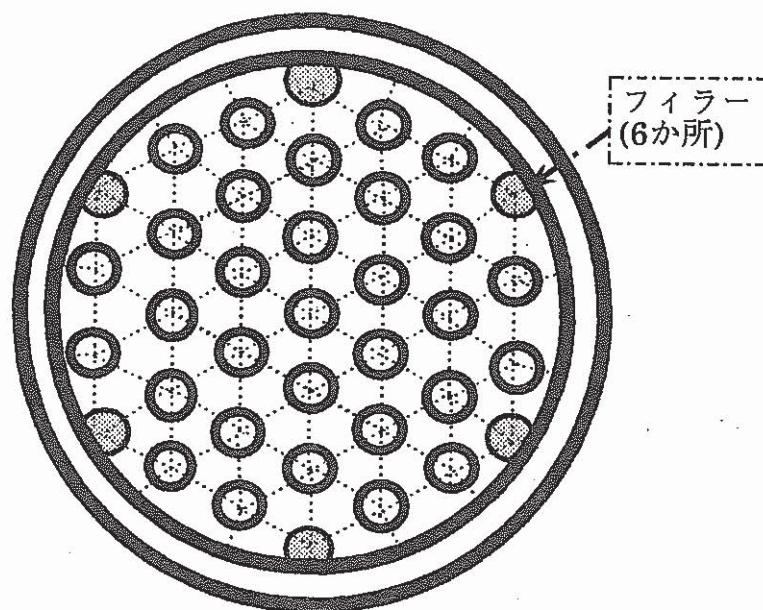
第2.4図 VORTEXコードの適用範囲



第2.5図 内層19本が正三角形格子状配列の37本バンドル



第2.6図 同芯円状配列の37本バンドル



第2.7図 正三角形格子状配列の31本バンドル

3. 長 寿 命 化 の 検 討

3.1 解析条件

(1) 寸法条件

第3.1表に、設定固定した(61年度レファレンス炉心の)制御棒の主要寸法仕様と、その設定根拠を示す。また、第3.2表に、原型炉粗調整棒の寸法仕様との比較を示す。以下、寸法仕様設定根拠に関連して補足する。

- ・ 熱膨張率の小さいフェライト鋼を被覆管材として採用することは、炉停止時および炉外取出し時のACMI急増を避ける上で好適であるが、実績が乏しいので、被覆管以外の構造材も含めてオーステナイト鋼とした。
- ・ 被覆管肉厚およびピン間ギャップ幅一定条件では、ピン本数が少ないほど¹⁰B装荷量を多くできる(10B装荷量一定条件では、濃縮度を下げることができる。)が、ピン1本当たりの線出力が増加し、ペレット温度が上昇する。
- ・ バイパス部(アニュラス部)流量抑制上は、案内管と保護管のギャップ幅を狭めた方が良いが、制御棒挿入性の観点で限界がある。
- ・ ピン全長を短くするほど、制御棒挿入性上、有利である。
- ・ 同芯円状配列の37本のバンドルは、同一のピン間ギャップ幅(最小値)を保って、同一寸法の保護管内で、内層19本が正三角形格子状配列の37本バンドルに並び変えることができる。(長寿命化の観点では、これらの配列間の優劣は無い。)
- ・ ピン間ギャップ幅は最小値を示したもので、それより広いギャップもある。
- ・ ピン保護管間ギャップ幅は、同芯円状配列の37本バンドルでは、全て等しいが、内層19本が正三角形格子状配列の37本バンドルでは、それより広いギャップもある。

長寿命化の観点で、サーベイしたパラメータは、ペレット・被覆管間直径ギャップ幅である。原型炉において0.7mmであることを参考とし、0.4mmから1.2mmまで0.2mmステップで変化させた。

(2) 核熱条件

第3.3表に、主要核熱条件(SCANNERコードによる計算結果を、一部含めて示した。)と、

その設定根拠を示す。また、第3.2表に、原型炉粗調整棒の核熱条件との比較を示した。以下、核熱条件設定根拠に関連して補足する。

- ・ 制御棒は、内側主系統棒、外側主系統棒、および後備系統棒に分類されるが、このうち、反応率が最大であり、このためペレットのスエリング量、発熱量とも最大となる、外側主系統棒を解析対象として選定した。
- ・ ^{10}B 装荷量は、3年間の反応度補償を考慮して決めたものであるが、解析上の制御棒寿命は4年とした。従って、高速中性子照射量および燃焼度は、4年照射後の値である。

61年度設計研究においては、制御棒の吸収ピンバンドルとして、55本バンドルを採用していた。このため、37本バンドルについての核計算は未実施である。第3.4表に、55本バンドルの新制御棒(この場合、 ^{10}B 濃縮度は、29.8w/o)の、50cm、30cm、および0cm挿入時のペレット反応率軸方向分布を示した。この反応率軸方向分布をSCANNERコードの入力データとして用いたが、コード内で37本バンドルとした時の ^{10}B 濃縮度を算出し、濃縮度に関する補正を行ったピーク反応率が用いられるので問題は無い。また、反応率軸方向分布形状は、照射初期においてはそのまま用いられるが、照射に伴う ^{10}B の減損を計算し、照射に伴う軸方向分布形状の変化を考慮している。また、第3.5表に、バイパス部Naの γ 発熱量軸方向分布を示した。

第3.6表に、SCANNERコードの入力データとして用いたホットスポット係数の値を示した。過出力係数は、1.14(熱出力誤差2%は、ホットスポット係数の中に含めているので、この2%分を除外した値)とした。

3.2 解析結果

(1) ペレット最高温度

第3.1図に、制御棒当たり吸収ピン本数を37本とした場合と、19本(保護管内径、ピン間クリアランスが保存されるように、ピン径を増加した仕様)とした場合のそれぞれの場合について、SCANNERコードによる、寿命中のペレット最高温度の、製作時ペレット・被覆管間直径ギャップ幅への依存性解析結果を示した。尚、ペレット温度が最高となるのは、出漸減、ギャップコンダクタンス漸増、およびペレット熱伝導度漸減の相乗効果の結果、照射後約3か月においてである。

19本とした場合には、過出力時ペレット最高温度ホットスポット値が融点を下回るよ

うな、製作時のペレット-被覆管間直径ギャップ幅の最大値は、0.4mm弱と極めて小さく、制御棒長寿命化は困難であることが分かる。一方、37本とした場合には、直径ギャップ幅を最大約1.2mmまで広げることが可能との結果が得られた。従って、長寿命制御棒を実現する上で、制御棒当たり吸収ピン本数として、37本を選定することは妥当と結論される。

37本を選定した場合、上記の如く、ペレット溶融防止の観点では、直径ギャップ幅を最大約1.2mmまで広げることが可能である。しかし、ギャップ幅を広くしたピンの照射実績が乏しいことに留意する必要がある。

(2) BDI量(吸収ピンバンドルと保護管の寸法干渉量)

4年照射後のBDI量解析評価結果を、第3.2図に示した。バンドルと保護管の高速中性子照射量が小さいので、スエリングの影響は無視できる程度に小さく、バンドルと保護管の膨れ差は、ACMIの最も厳しいペレットスタック下端高さで最大となる。

BDI量許容値は、燃料の場合には、炉外BDI模擬試験やPIEデータより、ワイヤ径の2倍～4倍($2d_w \sim 4d_w$)との知見が得られているが、制御棒の場合のBDI量許容値は今後の検討課題である。

仮に、その許容値を $1d_w$ としたならば、約0.8mm以上の、また $2d_w$ としたならば、約0.6mm以上の、製作時のペレット-被覆管間直径ギャップ幅がそれぞれ、4年寿命達成のため必要であることが分かる。

(3) 被覆管フープ応力

製作時のペレット-被覆管間直径ギャップ幅が0.6mmおよび0.8mmのそれぞれの場合について、被覆管フープ応力の解析評価結果、およびACMIの開始時期を第3.7表に示した。また、第3.8表に照射材の降伏応力データを示した。上記BDI量評価結果と併せ、総合的に判断し、以下の結論を得た。

- ① 被覆管のスエリング/照射クリープ挙動が、61年度設計研究において使用の従来式に従う様ならば、
 - ④ ACMI発生後、長期間の継続照射を行っても、フープ応力は通常運転時、炉停止時において、降伏応力を下回る。また、炉外取り出し時には降伏応力を大きく上回ることがないとの結果を得た。したがって、ACMI発生に起因するフープ応力は、寿命制限因子にならないと考えられる。

①ACMI発生後、BDI量は漸増するので、BDIが寿命制限因子になるとの結果を得た。BDI量制限値を、暫定的にワイヤ径1本分とするならば、ACMI発生後、約1年の長期間の継続照射(制御棒寿命としては約4年)達成の見通しがある。

② 被覆管のスエリング/照射クリープ挙動が、新しい知見に基づき設定された式(62年度において、燃材部より提示された、スエリングピーク温度が従来予測式と比べて、低温側に移動し、定常クリープ速度が従来式の約半分であることを特徴とする式)に従う様ならば、照射クリープによる応力緩和が十分進行しないため、ACMI発生後の継続照射を行うと、炉停止時および炉外取り出し時における被覆管フープ応力は、降伏応力を大きく上回るとの結果を得た。したがって、ACMI発生後の長期間の継続照射達成は厳しいと考えられる。

第3.1表 寸法仕様とその設定根拠

項目	設定値	設定根拠
ピン本数(ー)	37	原型炉吸収ピンバンドル(19本)より、一層分多くした。
案内管外径(mm)	φ173.8	燃料集合体外対面幅寸法に一致させた。
案内管肉厚(mm)	4.0	燃料集合体ラッパ管肉厚に一致させた。
保護管外径(mm)	φ152.0	案内管との直径ギャップ幅を、原型炉の10.6mmより大きい13.8mmとしたことによる。
保護管内径(mm)	φ147.8	保護管肉厚が原型炉の2mmより若干大きくなるようにしたことによる
ピン間ギャップ幅 (mm)	0.1	冷却材混合、流力振動の観点で狭い方が好ましいが、組立性上ギャップが必要である。
ピン・保護管間 ギャップ幅(mm)	0.05	ピン間ギャップ幅の半分とした。(0.1mmとしても影響は小さいと推定される。)
被覆管肉厚(mm)	0.4	スクラム時応力検討結果により成立性見通しを得ている。
ワイヤ径(mm)	φ1.2	原型炉におけるワイヤ径に等しくした。
ワイヤ巻付けピッチ (mm)	165	炉心燃料ピンの巻付けピッチに等しくした。
スタック上端～ピン上端(mm)	140	上部端栓部、上部プレナム部設置を念頭において設定した。
スタック下端～ピン下端(mm)	580	下部端栓部、下部プレナム部設置を念頭において設定した。
ピン全長(mm)	1720	スタック部長さ1000mmに、スタック部上方および下方の寸法を加えた。
集合体配列ピッチ (mm)	179.8	61年度炉心設計結果による。
集合体全長(mm)	4300	61年度炉心設計結果による。
ペレット密度 (%T.D.)	95	61年度炉心設計結果による。
集合体当たり ¹⁰ B装 荷量(kg)	5.43	61年度炉心設計結果による。

注) 被覆管材としては、改良オーステナイト鋼を採用。

第3.2表 評価対象主系統棒と原型炉粗調整棒の仕様比較

項目	評価対象の主系統棒	原型炉粗調整棒
集合体配列ピッチ(mm)	179.8	115.6
集合体当たりピン本数	37	19
吸収ピン形式	ベント型Heボンド方式	シール型
被覆管外径(mm)	φ20.2	φ16.9
被覆管肉厚(mm)	0.4	2.0
ピン間ギャップ幅(mm)	0.1	0.1
ワイヤピッチ(mm)	165	239
ペレット密度(% T.D.)	95	95
スタック部長さ(mm)	1000	800
バイパス部 直径ギャップ幅(mm)	13.8	10.6
ペレット線出力(W/cm)	330 ^{**})	~250 ^{**})
径方向出力ピーキング(ー)	1.11 ^{**})	1.056 ^{**})
軸方向出力ピーキング(ー)	3.8 ^{**})	2.54 ^{**})
寿命(EFPD)	1460(365日x4サイクル)	296(148日x2)
高速中性子照射量(nvt)	21x10 ²²	< 9x10 ²²
ペレット・被覆管間 直径ギャップ幅(mm)	0.4~1.2 (サーベイ範囲)	0.7
ピーク燃焼度(capt/cc)	173~189x10 ²⁰ *)	~100x10 ²⁰
¹⁰ B濃縮度(weight %)	28~31*)	39
¹⁰ B装荷量(kg)	5.4	1.26
制御棒当たり流量(kg/sec)	4.5	8.18
制御棒当たり発熱量(kW)	440 ^{**})	266 ^{**})

注記*) ペレット・被覆管間直径ギャップ幅を、0.4~1.2mmの範囲で変化させたときの値を示す。(ピーク燃焼度、および¹⁰B濃縮度は、ペレット径の大きさに依存する。ペレット径は、ペレット・被覆管間直径ギャップ幅に依存する。)

**) 寿命初期半挿入状態での値を示した。

第3.3表 核熱条件と、その設定根拠

項目	設定値	設定根拠(設定方法)
反応率軸方向分布	第3.4表	新制御棒7群RZ拡散計算結果。
ペレット線出力(W/cm)	330 [*])	SCANNER計算結果(最大値)。
ペレット発熱割合(-)	0.951	被覆管、ワイヤ、保護管、保護管内Naの γ 発熱を考慮。
径方向出力ピーキング(-)	1.106 [*])	正三角形格子状配列55本バンドル計算結果1.164より換算。
軸方向出力ピーキング(-)	3.8 [*])	新制御棒7群RZ拡散計算結果。
保護管より下部におけるNaの γ 発熱量(kW)	115 [*])	新制御棒7群RZ拡散計算結果。(但し、SUSの γ 発熱量も含む。)
バイパス部におけるNaの γ 発熱量軸方向分布	第3.5表	新制御棒7群RZ拡散計算結果。(但し、SUSの γ 発熱量も含む。)
寿命(EFPD)	1460	核的には、1095EFPDだが、解析上の寿命として設定。
高速中性子照射量(nvt)	21x10 ²²	中性子束ピーク値2x10 ¹⁵ より。
ピーク燃焼度(capt/cc)	173~189x10 ²⁰	SCANNER計算結果(最大値)。
B-10濃縮度(weight %)	28~31	SCANNER計算結果。
B-10装荷量(kg)	5.433	61年度設計結果。
制御棒当たり流量(kg/sec)	4.5	61年度設計結果。
制御棒当たり発熱量(kW)	440 [*])	新制御棒7群RZ拡散計算結果。
制御棒挿入パターン	50cm挿入(BOC) 30cm挿入(MOC) 0cm挿入(EOC)	主系統棒の、一般的パターンを採用。
隣接集合体発熱量(MW)	8.9	61年度設計核計算結果。
隣接集合体流量(kg/sec)	41.5	61年度流配設計結果。

注記^{*}) 寿命初期半挿入状態での値を示した。

第3.4表 B₄C反応率軸方向分布(ピーク反応率 2.5×10^{14} cap./cc-secに対する相対値として示す。)

軸方向位置(cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
50cm挿入	1.0	0.56	0.44	0.38	0.28	0.19	0.12	0.07	0.04	0.02
30cm挿入	0.8	0.44	0.30	0.20	0.12	0.07	0.04	0.02	0.01	0
0cm挿入	0.5	0.18	0.08	0.05	0.03	0.01	0	0	0	0

注記) 軸方向位置は、ペレットスタック部下端よりの高さで示した。

第3.5表 バイパス部Naの γ 発熱量軸方向分布

軸方向範囲	発熱量(kW)
B ₄ Cスタック部より下部(軸方向長さ:58cm)	34.6
B ₄ Cスタック部下端より、0cmから10cmまで	2.1
B ₄ Cスタック部下端より、10cmから20cmまで	1.0
B ₄ Cスタック部下端より、20cmから30cmまで	0.52
B ₄ Cスタック部下端より、30cmから40cmまで	0.26
B ₄ Cスタック部下端より、40cmから50cmまで	0.13
B ₄ Cスタック部下端より、50cmから60cmまで	0.07
B ₄ Cスタック部下端より、60cmから70cmまで	0.03
B ₄ Cスタック部下端より、70cmから80cmまで	0.02
B ₄ Cスタック部下端より、80cmから90cmまで	0.01
B ₄ Cスタック部下端より、90cmから100cmまで	0.01
B ₄ Cスタック部上端より上部(軸方向長さ:14cm)	0.03

第3.6表 ペレット最高温度評価用ホットスポット係数

ホットスポット定数または係数(HSF)	採用値
原子炉入口温度に関するホットスポット定数	2.3(°C)
冷却材温度上昇幅に関するホットスポット係数	1.483
被覆管外面film dropに関するホットスポット係数	3.745
被覆管内外面温度差に関するホットスポット係数	2.426
被覆管内面・ペレット外面温度差に関するHSF	1.441
ペレット内温度上昇幅に関するHSF	1.339

注)各定数、係数の定義詳細は、SCANNERコードのマニュアル⁽⁴⁾に示す。

第3.7表 被覆管フープ応力とACMI開始時期

製作時直径ギャップ幅 (mm)	0.6	0.8
ACMI開始時期 (EFPD)	790	1120
運転時最大応力 (kgf/mm ²)	29 (53)	12 (39)
炉停止時最大応力 (kgf/mm ²)	65 (<u>91</u>)	48 (<u>83</u>)
最大応力発生時期 (EFPD)	1095 (1095)	1200 (1460)
炉外取り出し時応力 (kgf/mm ²)	<u>91</u> (<u>126</u>)	<u>91</u> (<u>126</u>)
運転時被覆管温度 (°C)	400	
炉停止時被覆管温度 (°C)	200	
炉外取り出し時被覆管温度 (°C)	20	

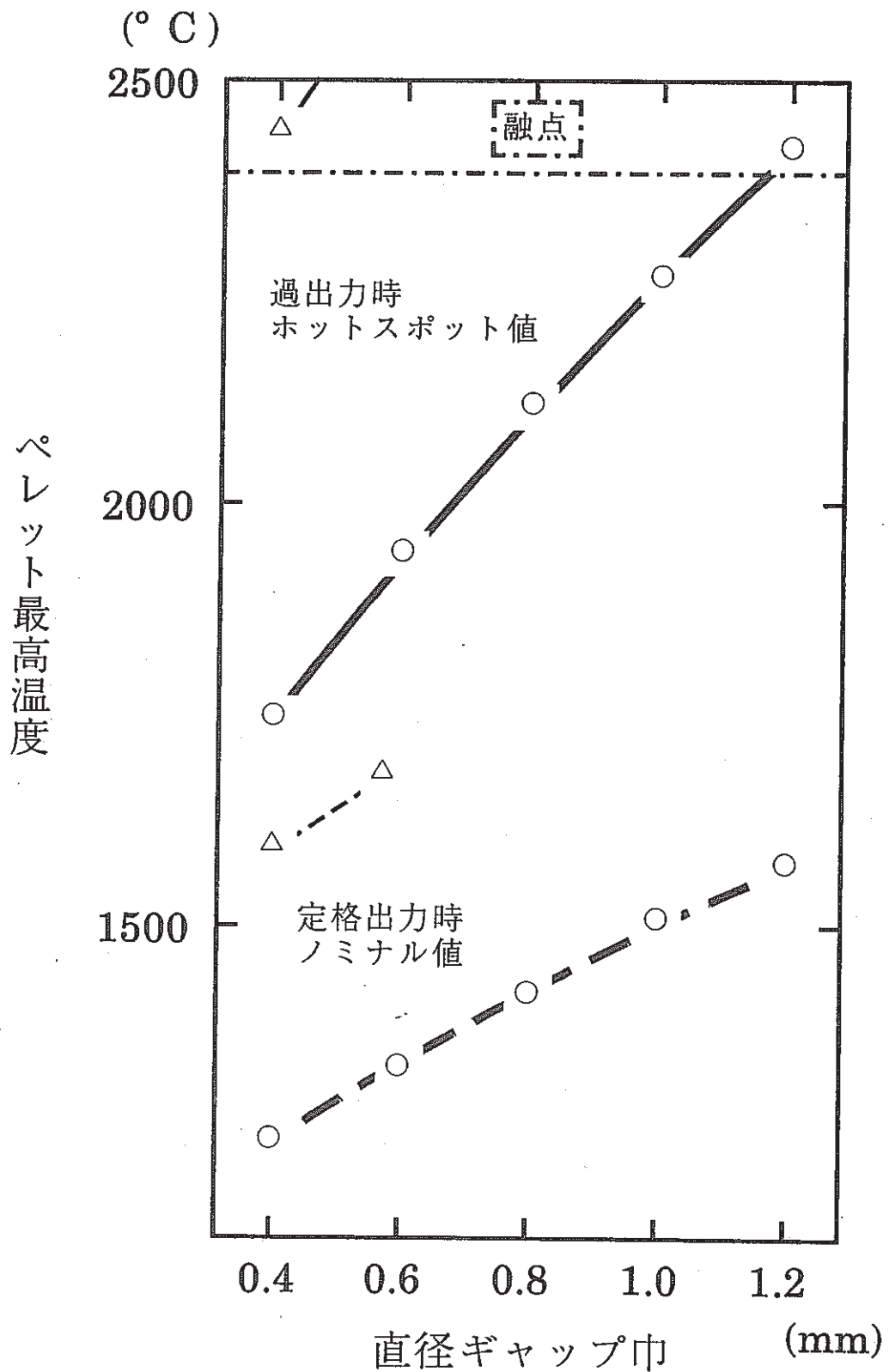
注) 括弧内の数値は、被覆管の照射クリープ式の定常クリープ速度の係数を1/2倍に変更して、計算した結果を示す。

また、下線付きの数値は、降伏応力並か、それを上回ることを示す。

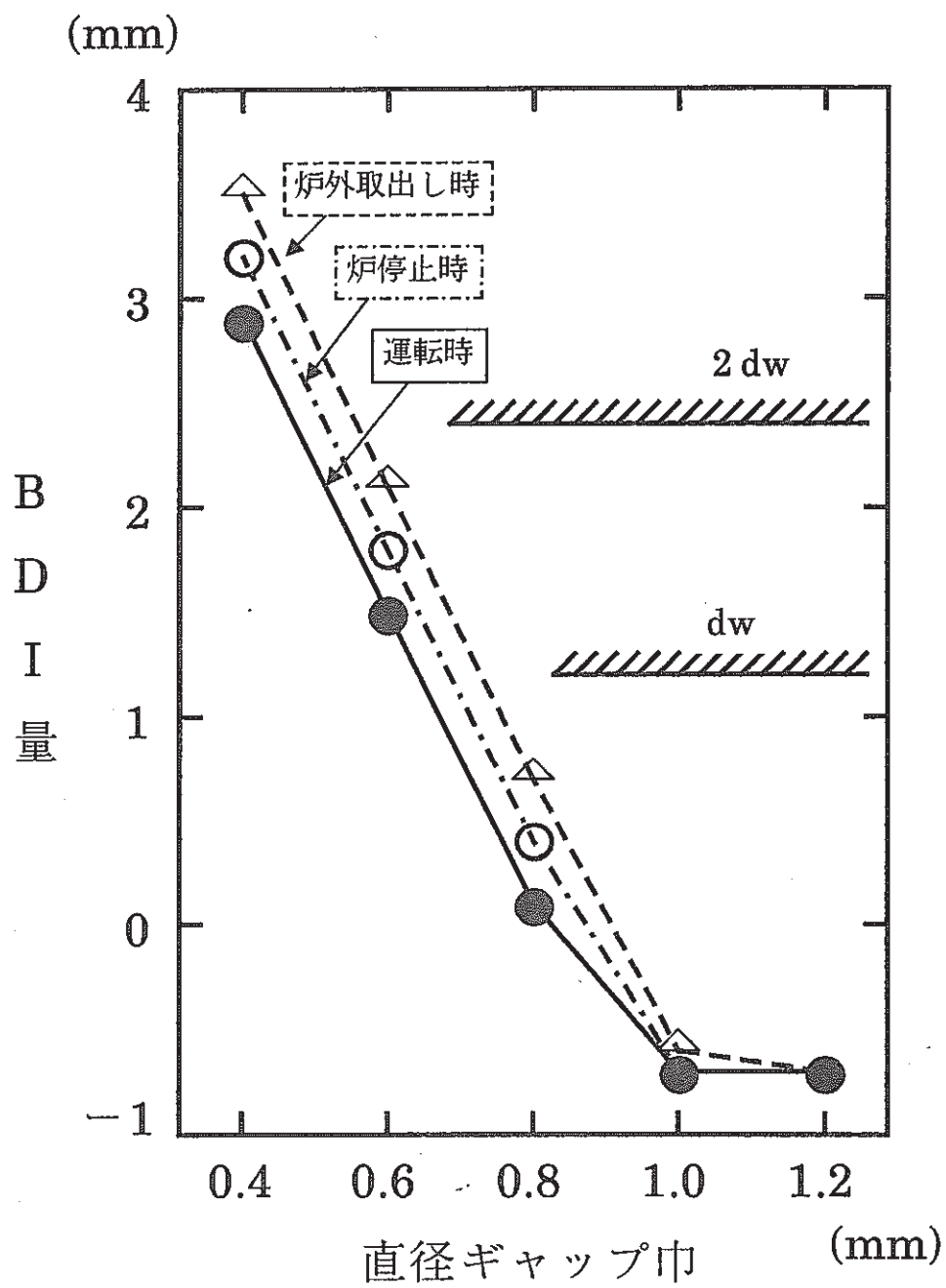
第3.8表 オーステナイト鋼の降伏応力(照射材)

試験温度 (°C)	20	400
降伏応力(kgf/mm ²)	~88	~68

注)FFTF用被覆管(SUS316 20%冷間加工材)を、 $8.3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ (E)0.1MeV)までEBR-IIで照射した後の測定値(ノミナル値)である。(13)



第3.1図 ペレット温度のギャップ巾依存性
(△ ; ピン本数19本の場合)



第3.2図 BDI量のギャップ巾依存性

4. 出口冷却材温度高温化の検討

4.1 解析条件

(1) 寸法条件

第4.1表に、設定固定した(61年度レファレンス炉心の)制御棒の主要寸法仕様と、その設定根拠を示す。同表の注記に示した様に、長寿命化の検討における条件とは若干異なる。以下、この違いについて補足する。

- ・ ピン本数および配列として、同芯円状37本バンドルと正三角形格子状31本バンドルの2種類を選定し、その優劣を比較することとした。
- ・ スクラム時応力検討結果により成立性見通しを得ることができたので、保護管肉厚を約1.0mmと薄くした。
- ・ バンドル部流動抵抗の低減を図るため(バンドル部への流量配分比の向上を図るため)、ワイヤ径の太径化を指向し、巻付け実績のある最大径 $\phi 1.5\text{mm}$ と、巻付けの可否が明らかではないが、より優れた流動特性の期待できる $\phi 2.0\text{mm}$ を選定した。
- ・ ワイヤ巻付けピッチの最適化を計るため、巻付けピッチとして、150mmと300mmの2種類を選定した。
- ・ 挿入性上の成立性は未検討であるが、バイパス部の流路面積を低減することの効果を把握するため、保護管外径として、 $\phi 152\text{mm}$ の他に $\phi 155\text{mm}$ とした時の評価も実施した。

(2) 核熱条件

第4.2表に示した様に、長寿命化の検討における条件とは異なり、制御棒当たりの冷却材流量は、寸法条件の異なる5ケース毎に変化させた。**VORTEX**コードで計算される被覆管内面最高温度ホットスポット値が、制限目安値 650°C にはほぼ等しくなるように、試行錯誤を行い、設定したものである。尚、被覆管内面温度が 650°C を越えると、 B_4C ペレットと被覆管の化学的相互作用が鋭敏化されているとされている。

第4.2表に示した**SCANNER**コードによる計算結果のうち、バンドル/バイパス部流量、バンドル/バイパス部渦拡散率比、および隣接燃料集合体よりの入熱量は、**VORTEX**コードの入力データとして用いた。

VORTEXコードの入力データとして用いた径方向出力分布を、第4.1図と第4.2図に、工学

的安全係数を第4.4表に示した。また、第4.3表に示した様に、偏向流係数として暫定的に0.6/0.4を用いたが、偏向流係数の影響を把握するため、0.3/0.2(ケース2')とした時の解析も実施した。

この0.6/0.4という値は、原型炉設計において使用された値に等しい。しかし、この値は燃料集合体内冷却材混合効果試験⁽⁸⁾データを参考にして設定されているので、実証炉制御棒への適用性については別途評価が必要である。

4.2 解析結果

(1) 流量配分比

第4.2表のケース1と2を比較して明らかなように、巻付けピッチを150mmから300に変えると、バンドル部への流量配分比が(47%から55%に)向上する。また、ケース2と3を比較して明らかなように、ワイヤ径を $\phi 1.5\text{mm}$ から $\phi 2.0\text{mm}$ に変えると、同様に(55%から59%に)向上する。これらは、バンドル部の流動抵抗を低減したことの結果である。バイパス部の流動抵抗を増加することにより、バンドル部への流量配分比の向上を図ることも可能であり、ケース2と4を比較することで、向上効果(55%から66%に)が明らかである。

正三角形格子状配列を採用した場合、吸収ピンが密に配列されるので、バンドル部の流動抵抗が大きい。このため、ケース2と5を比較することで明らかなように、バンドル部への流量配分比は同芯円状配列より低下(55%から42%に)する。

(2) 必要最小流量と冷却材出口温度

第4.2表と第4.3表により、被覆管内面最高温度ホットスポット値が 650°C となるような冷却材流量(必要最小流量)と、その流量条件でのサイクル末期冷却材出口温度を抜粋して、第4.5表に示した。

ケース1と2の比較より明らかなように、巻付けピッチを長くした方が、出口冷却材温度向上の観点で若干(5°C だけ)有利との結果が得られているが、ケース1と2で偏向流係数が同じで良いという保証は無い。しかし、ケース2と2'の比較より、偏向流係数を半分にしても、出口冷却材温度は 3°C 低下するだけなので、巻付けピッチを長くした方が不利であるとは考えられない。

ケース2と3、またケース2と4の比較により、ワイヤ径を $\phi 1.5\text{mm}$ から 0.5mm だけ太径化すると 7°C だけ、また保護管-案内管間直径ギャップ幅を 13.8mm から 3mm だけ狭めると

10°Cだけ、出口冷却材温度向上の期待できることが分かる。

ケース2と5の比較により、同芯円状配列の正三角形格子状配列に対する有利性が明らかである。

(3) 被覆管周方向最大温度差

各層のピンについて、被覆管周方向最大温度差評価結果を、第4.6表に示した。同芯円状配列についての周方向最大温度差は、第4.3表ケース2の解析結果より、また、正三角形格子状配列についてそれは、同表ケース5の解析結果より算出したものである。

中心から第2番目の層に配置された6本のピンの被覆管周方向最大温度差は、同芯円状配列における方が3倍程大きい。第3層および第4層のピンの被覆管周方向最大温度差は、正三角形格子状配列におけるよりも遥かに小さい。バンドル内の被覆管周方向最大温度差は、同芯円状配列における方が約35°Cだけ小さい。

したがって、同芯円状配列の方が、配列自体としては(内部サブチャンネルとして四角サブチャンネルを含むから)、流路変形に対する抵抗は小さいけれども、被覆管に生じる熱湾曲モーメントが小さいため、必ずしも流路変形の観点で不利とは限らない。また、37本程度の少数ピンならば、原型炉制御棒と同様に上下端を固定(上端は軸方向伸びを許容)した構造とするのが容易であり、上下端を固定することで流路変形を抑制できると考えられる。

第4.1表 寸法仕様とその設定根拠

項目	設定値	設定根拠
ピン本数(ー)	37 or 31	原型炉吸収ピンバンドル(19本)より、一層分多くした。
案内管外径(mm)	φ173.8	燃料集合体外対面幅寸法に一致させた。
案内管肉厚(mm)	4.0	燃料集合体ラッパ管肉厚に一致させた。
保護管肉厚(mm)	約1.0*)	スクラム時応力検討結果により成立性見通しを得ている。
ピン間ギャップ幅 (mm)	0.1	冷却材混合、流力振動の観点で狭い方が好ましいが、組立性上ギャップが必要である。
ピン・保護管間 ギャップ幅(mm)	0.05	ピン間ギャップ幅の半分とした。(0.1mmとしても影響は小さいと推定される。)
被覆管肉厚(mm)	0.4	スクラム時応力検討結果により成立性見通しを得ている。
スタック上端～ピン上端(mm)	140	上部端栓部、上部プレナム部設置を念頭において設定した。
スタック下端～ピン下端(mm)	580	下部端栓部、下部プレナム部設置を念頭において設定した。
ピン全長(mm)	1720	スタック部長さ1000mmに、スタック部上方および下方の寸法を加えた。
集合体配列ピッチ (mm)	179.8	61年度炉心設計結果による。
集合体全長(mm)	4300	61年度炉心設計結果による。
ペレット密度 (%T.D.)	95	61年度炉心設計結果による。
集合体当たり ¹⁰ B装 荷量(kg)	5.43	61年度炉心設計結果による。

注記) 第3.1表の仕様条件との違いは、保護管肉厚を薄くしたこと、保護管外径、ワイヤ径、ワイヤ巻付けピッチ、ピン本数をパラメータとしたことにある。

第4.2表 SCANNERコードによる解析条件と解析結果

項目	ケース1	ケース2	ケース2'	ケース3	ケース4	ケース5
流量(kg/sec)	3.40	3.21	3.38	2.87	2.75	3.99
ピン本数(-)	37	37	37	37	37	31
ピン外径(mm)	φ20.2	φ20.2	φ20.2	φ19.6	φ20.6	φ22.0
保護管外径(mm)	φ152	φ152	φ152	φ152	φ155	φ152
保護管内径(mm)	φ150.1	φ150.1	φ150.1	φ150.0	φ152.9	φ150.0
ワイヤ径(mm)	φ1.5	φ1.5	φ1.5	φ2.0	φ1.5	φ1.5
巻付けピッチ(mm)	150	300	300	300	300	300
圧損(g/cm ²)	6.66	4.53	4.94	3.20	4.45	10.25
バンドル部流量(kg/sec)	1.59	1.77	1.86	1.69	1.82	1.69
バイパス部流量(kg/sec)	1.80	1.44	1.52	1.18	0.93	2.30
バンドル部渦拡散率比	0.263	0.274	0.280	0.270	0.275	0.273
バイパス部渦拡散率比	0.413	0.384	0.390	0.358	0.327	0.445
バンドル部流速(cm/sec)	32.2	35.7	37.5	30.9	35.6	47.2
バイパス部流速(cm/sec)	61.1	49.0	51.5	40.1	40.0	77.9
バンドル部Re数	7.49×10^3	8.29×10^3	8.71×10^3	7.96×10^3	8.37×10^3	8.22×10^3
バイパス部Re数	2.54×10^4	2.03×10^4	2.14×10^4	1.67×10^4	1.30×10^4	3.23×10^4
冷却材出口温度(BOC)(°C)	482	487	483	497	502	468
冷却材出口温度(EOC)(°C)	446	450	447	457	461	437
隣接集合体よりの入熱量 積分値(BOC) (kW)	78*)	68*)	76*)	50*)	41*)	101*)

注記*) 入熱量軸方向分布(単位:W/cm)を下表に示す。

軸方向位置(mm)	ケース1	ケース2	ケース2'	ケース3	ケース4	ケース5
3950	207	169	200	98	69	306
3221	233	192	225	113	79	339
3140	327	269	315	161	115	469
3000	359	297	346	186	132	502
2800	432	367	416	253	190	573
2600	556	492	537	383	309	686
2400	645	589	627	496	427	750
2200	568	528	553	462	414	643
2000**)	349	320	336	272	247	403
1800	47	21	37	0	0	97
1700	0	0	0	0	0	0

注記**) 炉中心高さ位置に相当する。

第4.3表 VORTEXコードによる解析条件と解析結果

項目	ケース 1	ケース 2	ケース 2'	ケース 3	ケース 4	ケース 5
流量(kg/sec)	3.40	3.21	3.38	2.87	2.75	3.99
ピン本数(-)	37	37	37	37	37	31
ピン外径(mm)	φ20.2	φ20.2	φ20.2	φ19.6	φ20.6	φ22.0
保護管外径(mm)	φ152	φ152	φ152	φ152	φ155	φ152
ワイヤ径(mm)	φ1.5	φ1.5	φ1.5	φ2.0	φ1.5	φ1.5
巻付けピッチ(mm)	150	300	300	300	300	300
CS(1),(3)/CS(2),(4) (-)	0.6/0.4	0.6/0.4	0.3/0.2	0.6/0.4	0.6/0.4	0.6/0.4
冷却材最高温度高さ(cm)	67	67	67	67	67	100
冷却材最高温度S/C# /径方向ピーキング係数(-)	#2 1.32	#1 1.37	#1 1.43	#1 1.27	#1 1.29	#3 1.39
冷却材最高温度ノミナル値 /ホットスポット値(°C)	536 644	536 644	536 645	536 644	536 644	539 649
被覆管内面最高温度高さ(cm)	62	62	62	62	62	99
内面最高温度S/C#/ピン#	#6,#7	#6,#7	#6,#7	#6,#7	#6,#7	#3,#5
被覆管最高温度ノミナル値 /ホットスポット値(°C)	538 650	538 650	538 650	538 650	538 650	539 650
スタック中央/上端でのバン ドル部冷却材平均温度(°C)	485 495	480 492	474 487	489 502	486 501	481 488
スタック中央/上端でのバイ パス部冷却材平均温度(°C)	437 459	446 467	443 463	458 479	469 489	429 451

注記) ①CS(1)は、内層ピンに巻き付けられたワイヤに対する偏向流係数、CS(2)は、外層ピンに巻き付けられたワイヤに対する、周辺ギャップにおける偏向流係数、CS(3)は、外層ピンに巻き付けられたワイヤに対する、内層ギャップにおける偏向流係数、CS(4)は、外層ピンに巻き付けられたワイヤに対する、内層・周辺間ギャップにおける偏向流係数である。

②高さ位置は、ペレットスタック部最下端(最大発熱高さ)からの距離で示した。

③使用したホットスポット係数の値を第4.4表に示した。

第4.4表 被覆管内面最高温度評価用工学的安全係数

処理法	因子	ΔT_{Na}	ΔT_{film}	ΔT_{clad}
統計	流路断面積製作公差	1.059	—	—
	ペレット製作公差	1.052	1.056	1.056
	被覆管肉厚製作公差	—	—	1.022
	冷却材物性値誤差	1.02	—	—
	被覆材熱伝導度誤差	—	—	1.03
	膜熱伝達率誤差	—	1.30	—
	ペレット偏心効果	—	1.80	2.20
乗算	出力分布誤差	1.20	1.20	1.20
	原子炉熱出力誤差	1.02	1.02	1.02
	流路変形効果	1.03	—	—
	集合体間流量配分誤差	1.08	—	—
	バンドル/バイパス流量配分誤差	1.05	—	—
	ワイヤ巻付け効果	—	2.36	—
	解析誤差*)	1.05	—	—

注記*) 保護管内サブチャンネル間流量配分および冷却材混合効果の解析誤差。

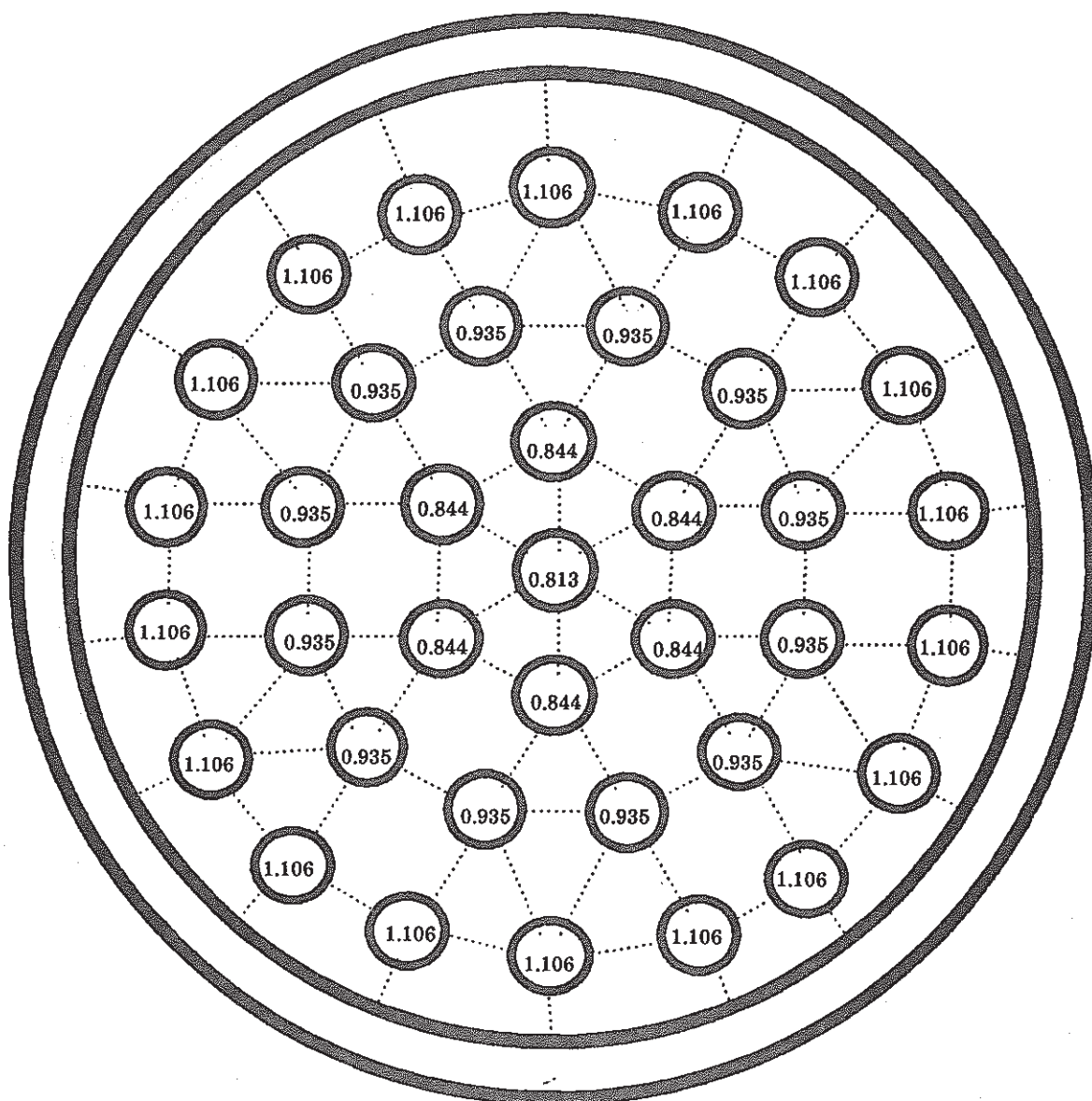
第4.5表 被覆管内面温度を650℃以下とするために必要な最小流量と、その場合のサイクル末期冷却材出口温度の評価結果

項目	ケース 1	ケース 2	ケース 2'	ケース 3	ケース 4	ケース 5
ピン本数(—)	37	37	37	37	37	31
ピン外径(mm)	φ20.2	φ20.2	φ20.2	φ19.6	φ20.6	φ22.0
保護管外径(mm)	φ152	φ152	φ152	φ152	φ155	φ152
保護管内径(mm)	φ150.1	φ150.1	φ150.1	φ150.0	φ152.9	φ150.0
保護管肉厚(mm)	0.95	0.95	0.95	1.00	1.05	1.00
ワイヤ径(mm)	φ1.5	φ1.5	φ1.5	φ2.0	φ1.5	φ1.5
巻付けピッチ(mm)	150	300	300	300	300	300
必要最小流量(kg/sec)	3.40	3.21	3.38	2.87	2.75	3.99
冷却材出口温度(EOC)(℃)	446	450	447	457	461	437

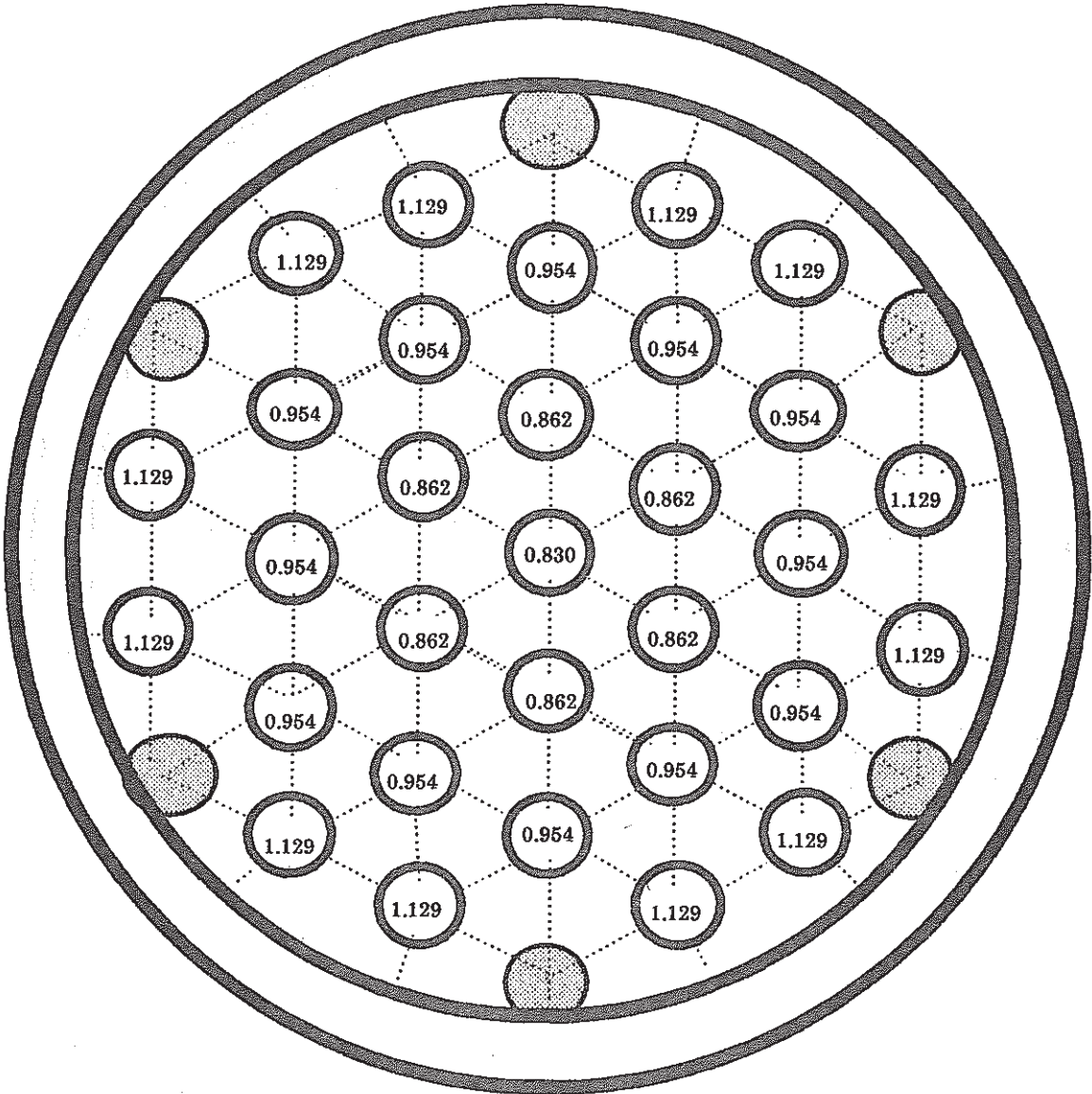
注記) ケース2'は、他のケースと比べて、冷却材混合効果係数が1/2という条件のもとで、検討評価したものである。

第4.6表 被覆管周方向最大温度差

配列の種類	集合体流量	第2層ピン	第3層ピン	第4層ピン
同芯円状(ケース2)	3.21 kg/sec	約45℃	約25℃	約35℃
正三角形状(ケース5)	3.99 kg/sec	約15℃	約80℃	約70℃



第4.1図 同芯円状配列の37本バンドルにおける
径方向出力分布



第4.2図 正三角形格子状配列の31本バンドルにおける
径方向出力分布

5. ま と め

今回の検討で得られた結論を、以下にまとめて示す。

- (1) 燃料集合体径方向寸法の増加に伴い、吸収ピン1本当たりの線出力を抑制するためには、制御棒当たりの吸収ピン本数を37本または31本とするのが良い。
- (2) ACMI発生後、長期間の継続照射を行っても、通常運転時のフープ応力は照射クリーブによって緩和され、被覆管の健全性が損なわれることは無い。しかし、炉停止時および炉外取り出し時には、ペレットと被覆管の熱収縮差のため、フープ応力は通常運転時の値から熱収縮差の分だけ急上昇し、通常運転時フープ応力が大きい場合には、炉停止時および炉外取り出し時のフープ応力が被覆管の降伏応力を上回る。したがって、被覆管の照射クリーブ特性が、ACMI発生後の長期間の継続照射可能性を支配する。
- (3) 被覆管の照射クリーブ特性として、照射クリーブ式で言うならば、照射量に依存しない項の係数が $9.8 \times 10^{-27} (\text{kgf/mm}^2 \cdot \text{n/cm}^2)^{-1}$ と表される(すなわち、高速原型炉SUS316 20% CW 材の参考評価用照射クリーブ式⁽⁹⁾の係数と同じ値)ならば、フープ応力は寿命制限因子にはならない。このとき、制御棒寿命は、バンドルと保護管の膨れ差(BDI)によって制限されるが、ACMI発生後、約1年の継続照射が可能である。
- (3) 37本バンドルを選択するならば、バンドル部の径方向(水平方向)温度分布平坦化のため、これらを同芯円状に配列するのが良い。
- (4) 同芯円状配列の37本バンドルは、正三角形格子状配列の31本バンドルと比較して、流路変形(バンドル変形)の観点で、構造的に不利であると考えられた。しかし、バンドル部流動抵抗を小さくできる(バンドル部への流量配分率を大きくできる)こと、および被覆管の周方向温度差を小さくできる(流路変形の引き金となる、ピンの熱湾曲モーメントを小さくできる)ことから、制御棒当たり流量の抑制(出口冷却材温度高温化)上、必ずしも不利とは限らないことが分かった。
- (5) 出口冷却材温度高温化の観点で、ワイヤ巻付けピッチの影響は小さいが、ワイヤ径を太径化することの効果は大きい。また、保護管と案内管の間のギャップを狭めることの効果も大きいことが分かった。

6. 今後の検討課題

今後の検討課題を、以下に列挙する。

- (1) ペレット・被覆管間ギャップ幅を広くした仕様の吸収ピンの照射データを取得し、ペレット破片のギャップ部への落下の有無とその影響や、ギャップガス温度高温化の、ペレットと被覆管との共存性への影響を明らかにし、ACMI開始時期を遅らせるため、ペレット・被覆管間ギャップ幅をどの程度まで広げて良いかを把握する必要がある。また、ペレット高燃焼度化時のペレットスエリングデータを取得し、今回使用のペレットスエリング式の適用性を確認する必要がある。
- (2) CORALコードは、炉停止時および炉外取り出し時におけるACMI応力急増時において、 B_4C ペレットの変形が生じないものと仮定し、応力を保守側に評価しているが、高燃焼度ペレットには微細なクラックが発生している⁽¹⁰⁾ので、未照射ペレットよりはるかに剛性が低下していると考えられる。^{(11)、(12)} したがって、今後高燃焼度ペレットの挙動データを取得し、CORALコードの応力評価モデルの合理化を図る必要がある。
- (3) 被覆管の、スエリング潜伏期間中の照射クリープ挙動が、ACMI開始後の長期間の継続照射達成可能性を左右するので、定常クリープ速度の精度向上が重要である。
- (4) ACMI開始後の長期間継続照射時の被覆管破損限界を明らかにするため、高照射量被覆管の短時間ひずみ許容値データの採取が必要である。
- (5) 熱収縮差に起因する被覆管フープ応力の急増、およびピンの熱湾曲モーメントに起因する流路変形を抑制する上で、熱膨張率の小さいフェライト鋼が有利であり、フェライト鋼採用を検討する必要がある。
- (6) 炉外取出時における被覆管破損を許容できるならば、長寿命化設計がより容易となるので、破損に伴うトリチウム放出を設備対応によって許容できるか検討することも有意義である。
- (7) 同芯円状37本バンドルについて、サブチャンネル間冷却材混合特性パラメータ(偏向流係数)を求めるための流動試験の実施を検討する必要がある。

- (8) 同芯円状37本バンドルの熱湾曲挙動解析コードの開発と、同コードの熱特性解析コードとの結合を検討する必要がある。
- (9) 同芯円状37本バンドルの採用が確定した時点で、BDI限界を明らかにするためのバンドル照射試験を行う必要がある。
- (10) 長寿命化よりも出口冷却材温度高温化に重点を置くならば、ワイヤの太径化が有効なので、巻付け性(製作性)の検討をする必要がある。(ワイヤを太径化すると、ピンが細くなり、ペレット燃焼度が上がるので、長寿命化上は不都合である。)
- (11) 出口冷却材温度高温化の観点で、保護管・案内管間のギャップ幅を狭めることが有効であり、制御棒挿入性上許容できる最小ギャップ幅を、ピン全長や保護管肉厚の影響を考慮して、検討する必要がある。

参 考 文 献

- (1) 池上 他, N9410 87-098 “レファレンス炉心の設定、高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究”
- (2) 野崎 他, SN9520 88-001 “制御棒吸収ピン挙動解析コードCORALマニュアル”
- (3) 野崎, N9440 87-006 “高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究、昭和61年度成果報告会資料集, 2.10 B_4C ペレットと被覆管の機械的相互作用の検討”
- (4) 菰田 他, SN9520 88-013 “制御棒設計用コードSCANNER使用者マニュアル”
- (5) 菰田 他, SN9520 88- “制御棒熱特性解析コードVORTEX-Ⅲ使用者マニュアル”
- (6) 東芝, J901 81-09 “制御棒熱特性解析コードの開発”
- (7) 東芝, SJ201 77-02 “制御棒熱特性解析コードの開発”
- (8) 岡田 他, SN941 82-126 “高速炉燃料集合体内冷却材混合効果試験、37本ピンバンドル試験(第4報)”
- (9) 動燃, SN241 85-23(1) “高速原型炉燃料集合体及び炉心構成要素設計用物性値集”
- (10) Hollenberg et al, J. Amer. Cer. Soc., vol. 60, pp. 520-525, 1977
“The Effect of Fast Neutron Irradiation on the Structure of Boron Carbide”
- (11) Budiansky et al, Int. J. Solid Structures, vol. 12, pp. 1-97, 1976
“Elastic Moduli of a Cracked Solid”
- (12) Cleveland et al, J. Amer. Cer. Soc., vol. 61, pp. 478-481, 1978
“Grain Size/Microcracking Relations for Pseudobrookite Oxides”
- (13) Fish et al, ASTM STP vol. 683, pp. 450-465, 1979
“Tensile Property Correlations for Highly Irradiated 20 Percent Cold-Worked Type 316 Stainless Steel”

謝 辞

解析コードの開発、改良、および解析の実行にあたっては、ニュークリア・データ(株) 小林靖昌氏に協力頂きました。

ADS 野崎信久研究員には、CORALコードの使用にあたって、また、技術課 有井祥夫研究員には、VORTEXコード(旧バージョン)の使用にあたって、お世話になりました。

実証炉技術開発室 茶谷恵治副主任研究員には、解析結果に対して、種々の有益なコメントを頂きました。また、MMS 伊藤正彦室長代理には、制御棒全般に関して、種々の有益な御意見を頂きました。さらにまた、プラント工学室 若林利男主任研究員には、原稿ドラフトを査読して頂き、種々の有益なコメントを頂きました。

以上の方々に、深く感謝の意を表します。

尚、本検討に使用のSCANNERコードは、原子力工学試験センター 長井修一郎氏が、プラント工学室在籍中に、61年度より開発を開始したコードであることを追記します。

付録A 長寿命化の検討に関連して実施した解析結果の詳細

概要において述べたように、付録Aとして、本文第3章『長寿命化の検討』においては割愛した、ワイヤ径 $\Phi 1.5\text{mm}$ の場合を含めたSCANNERコードによる解析結果の詳細、および同芯円状配列の37本バンドルと内層19本を正三角形格子状に配列した37本バンドルについてのVORTEXコードによる解析結果の詳細を収録した。

SCANNERコードによる解析結果の詳細を付表A-1から付表A-13までに示した。付表A-1に、過出力時ペレット中心最高温度ホットスポット値 $T_{B_4C}^{H,OP}$ 、通常運転時ペレット中心最高温度ホットスポット値 $T_{B_4C}^{H,OP}$ 、通常運転時ペレット中心最高温度ノミナル値 T_{B_4C} 等の評価結果を、また付表A-5に、最高温度発生時期におけるペレット熱伝導率、ペレット・被覆管間ギャップコンダクタンス等を示した。照射とともに、ペレット・被覆管間ギャップ幅が減少するので、ギャップコンダクタンスは改善され、また付表A-2および付表A-3に示したように、線出力は低下するが、ペレット熱伝導率は燃焼とともに悪化する。付表A-5に示したように、第1サイクル40%挿入時のペレット熱伝導率が解析ケースにより若干異なる原因は、付表A-4に示したように、 ^{10}B 濃縮度が異なる(したがって、付表A-6に示したように、ペレットスタック下端高さにおける反応率が異なる)ことである。尚、付表A-12に、解析ケースの一例について、反応率等の軸方向分布を示した。

付表A-10に示したように、ペレットスタックと被覆管の伸び差は10mm以下であり、スタック上端からピン上端までの長さとして140mmを取っておけば、上部ガスプレナム内のスプリングのたわみで、伸び差は吸収可能と推定される。

付表A-13に、Na侵入量評価結果を示した。制御棒を炉心に装荷した時点で、Naヘッド圧のため、Naは下部ガスプレナム部下端に設置したHeベント孔から約167mmの高さまで侵入する。原子炉が通常運転に入ると、Naヘッド圧とカバーガス圧の増加、および冷却材循環に伴う圧力分布の発生により、Na侵入量は約278mmまで増大する。この状態のまま、燃焼が進めば、Heガス圧の増加のため、Na侵入量は減少することになるが、照射初期に流量増大型の異常な過渡変化が生じた時には、圧損の増加に伴い、Na侵入量は約304mmまで増加する。照射が十分進み、Naがガスプレナム外へ全て排出された通常運転状態において、過出力型の異常な過渡変化が生じ、その直後トリップされた場合、プレナムガス温度の低下により、Naが再び侵入する可能性があるが、外圧も低下するので、再侵入は起きないとの評価結果が得られた。こ

これらの結果から、スタック下端からピン下端までの長さとして580mmを取っておけば、Naが下部ガスプレナム部内に侵入しても、B₄Cスタック部には達しないと推定される。

付表A-7に示したように、ワイヤ径を太くした方が、バンドル流量が多くなるので、被覆管温度低減の観点で有利であるが、長寿命化上は、ペレット燃焼度を低くできる細径の方が有利である。したがって、概要で述べたように、Phase I の検討においては細径のφ1.2mmをレファレンスとした。

ワイヤ径をφ1.2mmとした場合について、同芯円状配列の37本バンドルと内層19本正三角形格子状配列の37本バンドルの、照射初期の熱流動特性比較結果(VORTEXコードによる解析結果)を付図A-1から付図A-10までに示した。

付図A-2と付図A-7より、同芯円状配列の方が径方向温度分布平坦化上、有利であり、集合体当たり流量を4.5kg/sec(共通)とした条件で、冷却材最高温度(ノミナル値)を約50°C低減できる。付図A-4と付図A-9より明らかなように、流量分布特性が優れているためである。尚、付図A-5と付図A-10に、sweeping crossflow WS と diversion crossflow WD を区別しないで、横方向質量流量として一括して示した。サブチャンネル番号の小さい方から大きい方への流れを、横方向質量流量の正方向と定義している。

付表A-1 過出力時ペレット中心最高温度ホットスポット値評価結果

(単位: °C)

ワイヤ径 (mm)		φ1.2					φ1.5				
直径ギャップ巾 (mm)		0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
ノ ミ ナ ル 温 度	Tin	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0	360.0
	ΔTNa	22.3	22.3	22.3	22.4	22.4	22.3	22.3	22.3	22.4	22.4
	ΔTfilm	19.7	19.7	19.7	16.6	16.6	21.1	21.1	21.1	17.8	17.8
	ΔTclad	11.4	11.4	11.4	9.7	9.7	11.6	11.6	11.6	9.9	9.9
	ΔTgap	492.0	597.5	689.0	645.0	715.1	498.1	604.7	697.1	651.8	722.5
	ΔTB ₄ C	295.2	295.2	295.2	440.1	442.0	295.2	295.2	295.1	443.4	445.5
	TB ₄ C	1201	1306	1398	1494	1566	1208	1315	1407	1505	1578
ホ ッ ト ス ポ ット 温 度	Tin ^H	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3	362.3
	ΔTNa ^H	33.1	33.1	33.1	33.3	33.3	33.1	33.1	33.1	33.2	33.2
	ΔTfilm ^H	73.5	73.5	73.5	62.2	62.2	79.1	79.1	79.1	66.9	66.9
	ΔTclad ^H	27.6	27.6	27.6	23.4	23.4	28.1	28.1	28.1	23.8	23.8
	ΔTgap ^H	709.0	861.0	992.9	929.5	1030.5	717.8	871.4	1004.4	939.3	1041.2
	ΔTB ₄ C ^H	395.3	395.3	395.3	589.3	591.8	395.3	395.3	395.3	593.7	596.5
	TB ₄ C ^H	1601	1753	1884	2000	2103	1616	1769	1902	2019	2124
	TB ₄ C ^{H, OP}	1775	1948	2098	2229 ^{*)}	2348 ^{*)}	1791	1967	2118	2252 ^{*)}	2371 ^{*)}

注*) 過出力時ペレット中心最高温度ホットスポット値が最大となるのは、第1サイクル40%挿入時であり、無印については第1サイクル50%挿入時である。

付表A-2 吸収体部線出力軸方向分布と平均値 (ピン1本当たり)

(単位: W/cm)

時 期 軸方向位置 (mm)	BO1C	MO1C	EO1C	BO2C	MO2C	EO2C	BO3C	MO3C	EO3C	BO4C	MO4C	EO4C
0	311	224	130	259	187	108	216	155	90	180	129	74.8
100	174	129	50.9	159	117	46.3	144	107	42.1	131	96.9	38.2
200	137	89.4	23.3	128	83.7	21.8	120	78.3	20.4	112	73.3	19.1
300	118	60.2	14.8	113	57.3	14.1	107	54.6	13.4	102	51.9	12.8
400	87.2	36.5	9.0	84.4	35.3	8.8	81.7	34.2	8.5	79.1	33.1	8.2
500	59.2	21.5	3.1	58.0	21.0	3.0	56.8	20.6	2.9	55.7	20.2	2.9
600	37.4	12.3	0	36.9	12.2	0	36.5	12.1	0	36.1	11.9	0
700	21.8	6.2	0	21.7	6.2	0	21.5	6.1	0	21.4	6.1	0
800	12.5	3.1	0	12.4	3.1	0	12.4	3.1	0	12.3	3.1	0
900	6.2	0	0	6.2	0	0	6.2	0	0	6.2	0	0
1000	3.1	0	0	3.1	0	0	3.1	0	0	3.1	0	0
軸方向平均値	81.1	47.0	16.6	75.2	42.9	14.8	69.6	39.3	13.2	64.7	36.1	11.9

注) 被ふく管、ワイヤ、保護管、および保護管内Naの γ 発熱を含んだ値であり、 B_4C ペレットの (n, α) 反応による線出力は、表に示した値の95.1%である。

付表A-3 吸収体部線出力軸方向分布と平均値 (最大発熱ピンについて)

(単位: W/cm)

時 期 軸方向位置 (mm)	BO1C	MO1C	EO1C	BO2C	MO2C	EO2C	BO3C	MO3C	EO3C	BO4C	MO4C	EO4C
0	344	245	141	281	200	115	230	163	93.7	187	133	76.5
100	193	142	55.8	174	128	50.2	156	115	45.1	140	103	40.6
200	152	98.5	25.6	141	91.5	23.8	131	85.0	22.1	122	79.0	20.6
300	131	66.3	16.3	124	62.8	15.5	117	59.5	14.6	111	56.4	13.9
400	96.4	40.3	10.0	93.0	38.8	9.6	89.8	37.5	9.3	86.6	36.1	9.0
500	65.4	23.7	3.4	64.0	23.2	3.3	62.6	22.7	3.2	61.2	22.2	3.2
600	41.3	13.6	0	40.8	13.5	0	40.3	13.3	0	39.7	13.1	0
700	24.1	6.9	0	23.9	6.8	0	23.8	6.8	0	23.6	6.7	0
800	13.8	3.4	0	13.7	3.4	0	13.7	3.4	0	13.6	3.4	0
900	6.9	0	0	6.9	0	0	6.9	0	0	6.9	0	0
1000	3.4	0	0	3.4	0	0	3.4	0	0	3.4	0	0
軸方向平均値	89.7	51.7	18.2	82.3	46.8	16.0	75.8	42.5	14.1	70.0	38.7	12.6

注) 被ふく管、ワイヤ、保護管、および保護管内Naの γ 発熱を含んだ値であり、 B_4C ペレットの (n, α) 反応による線出力は、表に示した値の95.1%である。

付表A-4 ペレット径および ^{10}B 濃縮度計算結果

ワイヤ径 (mm)	ギャップ巾 (mm)	ペレット径 (mm)	^{10}B 濃縮度 (w/o)	^{10}B 濃縮度 (a/o)
$\phi 1.2$	0.4	$\phi 19.00$	28.0	29.9
	0.6	$\phi 18.80$	28.6	30.6
	0.8	$\phi 18.60$	29.2	31.2
	1.0	$\phi 18.40$	29.9	31.9
	1.2	$\phi 18.20$	30.6	32.6
$\phi 1.5$	0.4	$\phi 18.66$	29.1	31.1
	0.6	$\phi 18.46$	29.7	31.7
	0.8	$\phi 18.26$	30.4	32.3
	1.0	$\phi 18.06$	31.1	33.2
	1.2	$\phi 17.86$	31.8	33.9

付表A-5 被ふく管外表面熱伝達率、ギャップコンダクタンス、ペレット熱伝導率

ワイヤ径 (mm)	ギャップ巾 (mm)	熱伝達率 ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	ギャップコン ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	熱伝導率 ($\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$)	時 期
$\phi 1.2$	0.6	2.63	0.0965	0.051	1サイクル 40%挿入時
	0.8	2.63	0.0813	0.050	1サイクル 40%挿入時
$\phi 1.5$	0.6	2.49	0.0972	0.050	1サイクル 40%挿入時
	0.8	2.49	0.0820	0.050	1サイクル 40%挿入時

付表A-6 B₄Cペレット反応率、燃焼度、および¹⁰B残存率

(ペレットスタック下端位置)

ワイヤ径 (mm)	ギャップ巾 / ペレット径 (mm)	評価時点	B ₄ Cペレット 反応率 (Cap/cc-sec)	燃焼度 (Cap/cc)	¹⁰ B残存率 (-)
φ 1.2	0.4 / φ 19.00	BOL	2.59 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.574 × 10 ¹⁴	1.73 × 10 ²²	0.444
	0.6 / φ 18.80	BOL	2.64 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.587 × 10 ¹⁴	1.77 × 10 ²²	0.444
	0.8 / φ 18.60	BOL	2.70 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.599 × 10 ¹⁴	1.81 × 10 ²²	0.444
	1.0 / φ 18.40	BOL	2.76 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.612 × 10 ¹⁴	1.85 × 10 ²²	0.444
	1.2 / φ 18.20	BOL	2.82 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.626 × 10 ¹⁴	1.89 × 10 ²²	0.444
φ 1.5	0.4 / φ 18.66	BOL	2.68 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.596 × 10 ¹⁴	1.80 × 10 ²²	0.444
	0.6 / φ 18.46	BOL	2.74 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.609 × 10 ¹⁴	1.83 × 10 ²²	0.444
	0.8 / φ 18.26	BOL	2.80 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.622 × 10 ¹⁴	1.88 × 10 ²²	0.444
	1.0 / φ 18.06	BOL	2.86 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.636 × 10 ¹⁴	1.92 × 10 ²²	0.444
	1.2 / φ 17.86	BOL	2.93 × 10 ¹⁴	0.0	1.0
		EOL	0.650 × 10 ¹⁴	1.96 × 10 ²²	0.444

注) いずれも、ピークピンについて。

付表 A-7 バンドル流量の全流量に対する割合 (%)

ワイヤ径 評価式	$\phi 1.2$ mm	$\phi 1.5$ mm
Rehmeの式	45.4	48.1
原型炉設計式 *)	45.2	47.7
Blasiusの式 *)	52.7	55.7

注*) バンドル部圧損評価式の影響を調べるために参考として計算した結果も示す。

付表 A-8 S. Aokiの式による渦拡散率比

ワイヤ径 部 位	$\phi 1.2$ mm	$\phi 1.5$ mm
バンドル部	0.292	0.299
アニュラス部	0.454	0.447

付表 A-9 流速 (cm/sec) / レイノルズ数 (-)

ワイヤ径 部 位	$\phi 1.2$ mm	$\phi 1.5$ mm
バンドル部	45.4 / 9.7×10^3	44.9 / 1.0×10^4
アニュラス部	83.3 / 3.5×10^4	79.2 / 3.3×10^4

尚、圧力損失量は、 $\phi 1.2$ mmの場合に 11.5 g/cm^2 、 $\phi 1.5$ mmの場合に 10.5 g/cm^2 である。

付表 A-10 ペレットスタックと被ふく管の伸び差評価結果 (EOL)

ワイヤ径 (mm)	ペレット・被ふく管間 直径ギャップ巾 (mm)	ペレットスタック 伸び量 (mm)	被ふく管 伸び量 (mm)	伸び差 (mm)
φ1.2	0.4	15.1	7.3	7.8
	0.6	15.4	7.3	8.1
	0.8	15.7	7.3	8.4
	1.0	16.1	7.3	8.7
	1.2	16.4	7.3	9.1
φ1.5	0.4	15.6	7.3	8.3
	0.6	15.9	7.3	8.6
	0.8	16.3	7.3	8.9
	1.0	16.6	7.3	9.3
	1.2	17.0	7.3	9.7

付表 A-11 案内管出口冷却材温度評価結果 (単位 ; °C)

時 期	ワイヤ径 (mm)	φ1.2	φ1.5
BO1C		455.6	455.8
MO1C		443.2	443.7
EO1C		431.6	432.1
BO2C		452.9	453.2
MO2C		441.4	441.9
EO2C		430.7	431.3
BO3C		450.6	450.9
MO3C		439.8	440.3
EO3C		430.0	430.6
BO4C		448.5	448.8
MO4C		438.4	438.9
EO4C		429.4	430.0

付表 A-12 B₄Cペレット反応率、燃焼度、および¹⁰B残存率(ワイヤ径: $\phi 1.2$ mm、ペレットと被ふく管の直径ギャップ巾: 0.4 mm)

時 期	B O L		E O L		
ペレットスタック下端 からの高さ (mm)	反応率 (Cap/cc-sec)	反応率 (Cap/cc-sec)	燃焼度 (Cap/cc)	¹⁰ B 残存率 (-)	
0.	2.59×10^{14}	5.74×10^{13}	1.73×10^{22}	0.444	
1 0 0.	1.45×10^{14}	3.05×10^{13}	1.08×10^{22}	0.654	
2 0 0.	1.14×10^{14}	1.54×10^{13}	7.91×10^{21}	0.746	
3 0 0.	9.82×10^{13}	1.04×10^{13}	6.08×10^{21}	0.805	
4 0 0.	7.23×10^{13}	6.72×10^{12}	4.18×10^{21}	0.866	
5 0 0.	4.91×10^{13}	2.37×10^{12}	2.65×10^{21}	0.915	
6 0 0.	3.10×10^{13}	1.83×10^6	1.59×10^{21}	0.949	
7 0 0.	1.81×10^{13}	9.36×10^5	8.84×10^{20}	0.972	
8 0 0.	1.03×10^{12}	0.0	4.85×10^{20}	0.984	
9 0 0.	5.17×10^{12}	0.0	1.63×10^{20}	0.995	
1 0 0 0.	2.59×10^{12}	0.0	8.14×10^{19}	0.997	
軸方向平均値	6.73×10^{13}	9.41×10^{12}	4.34×10^{21}	0.861	

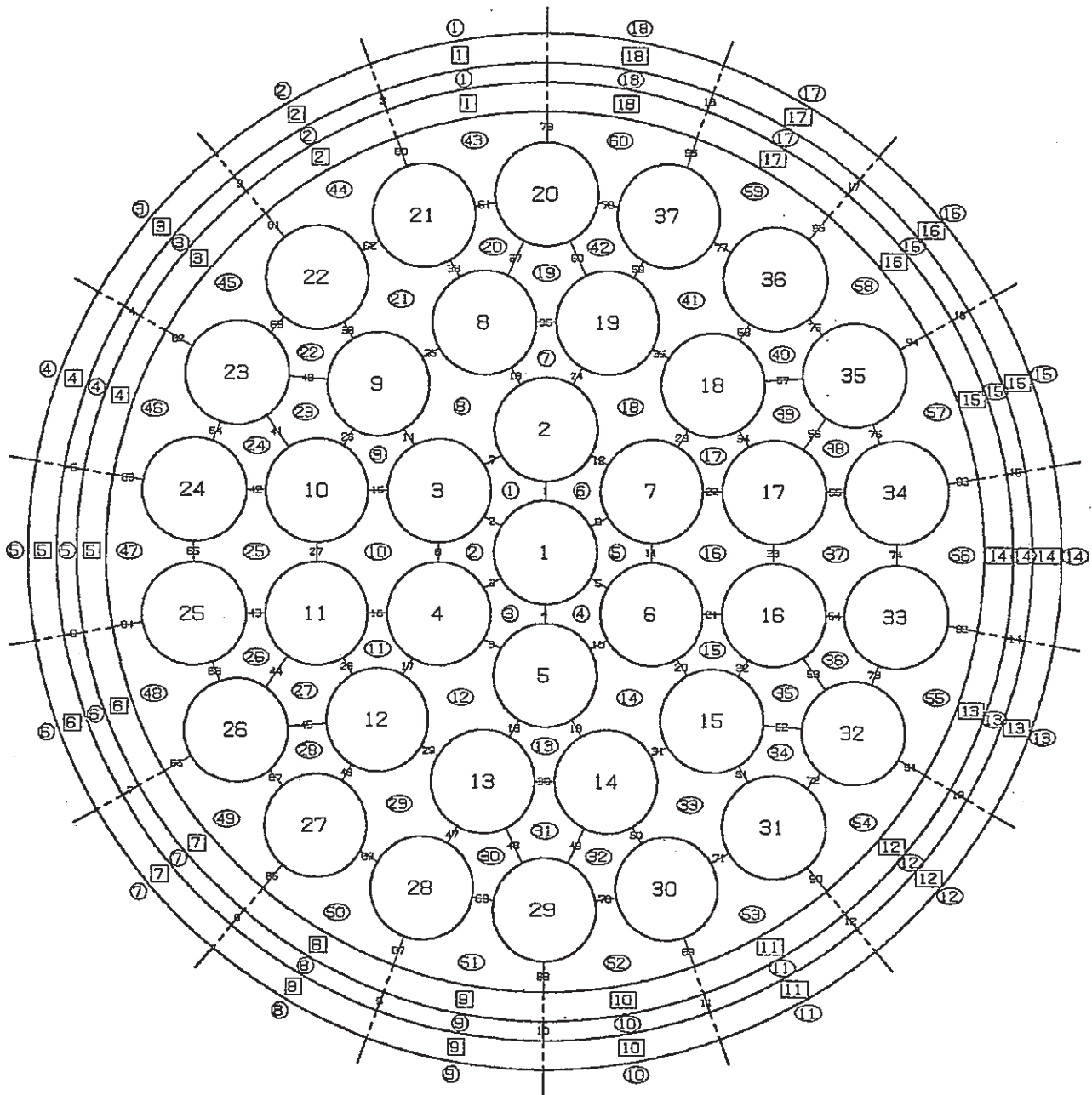
注) いずれも、ピークピンについて。

付表 A-13 Na 侵入量 (高さ) (単位: mm)

ワイヤ径 (mm)	炉 心 状 態			
	停止時	通常運転時	流量増大時	過出力時
$\phi 1.2$	1 6 6.7	2 7 8.1	3 0 4.3	0
$\phi 1.5$	1 6 6.7	2 7 8.2	3 0 4.4	0

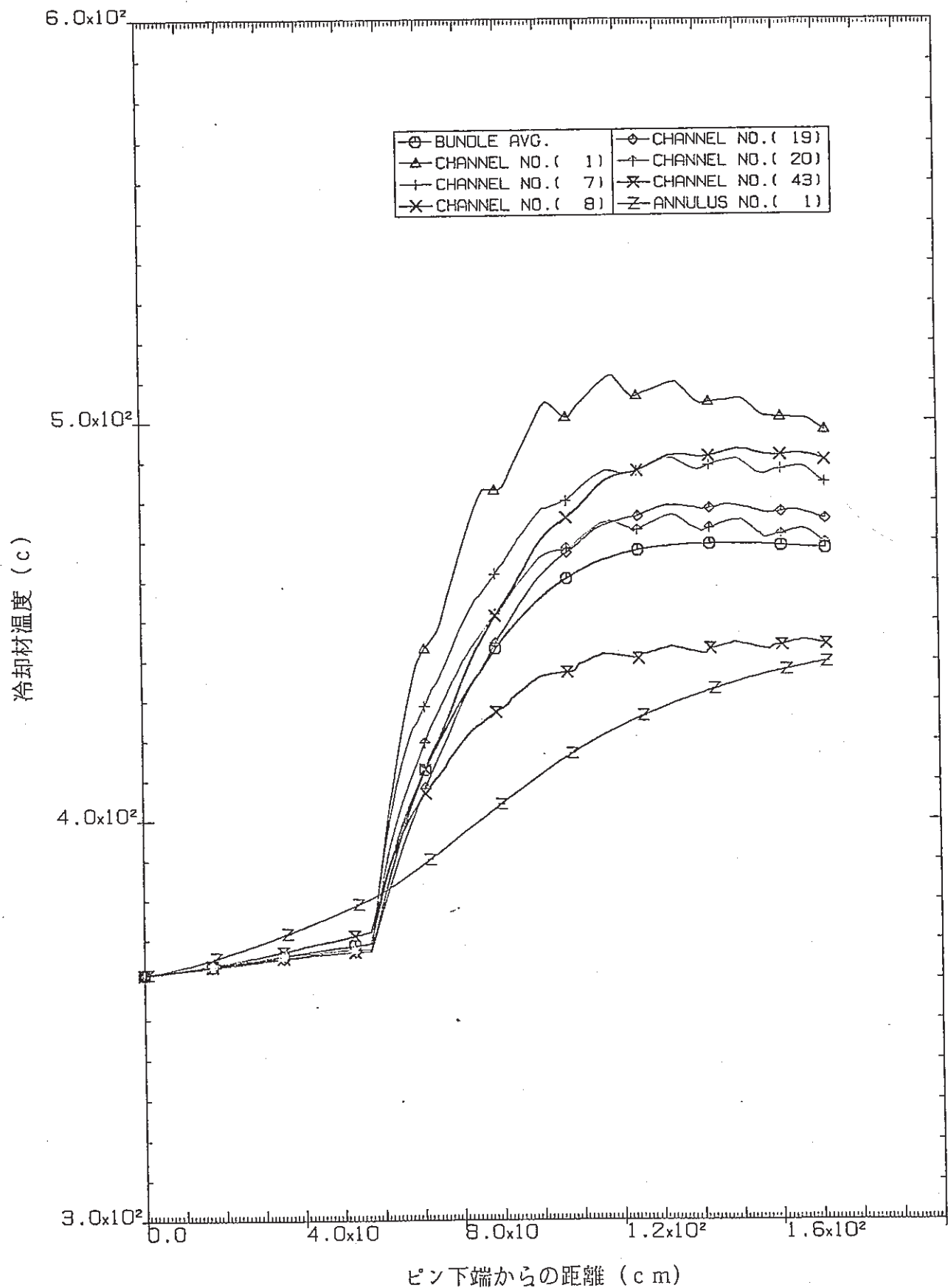
注 *) 1 2 0 % 過流量時を想定

**) 1 1 6 % 過出力後のトリップ時を想定

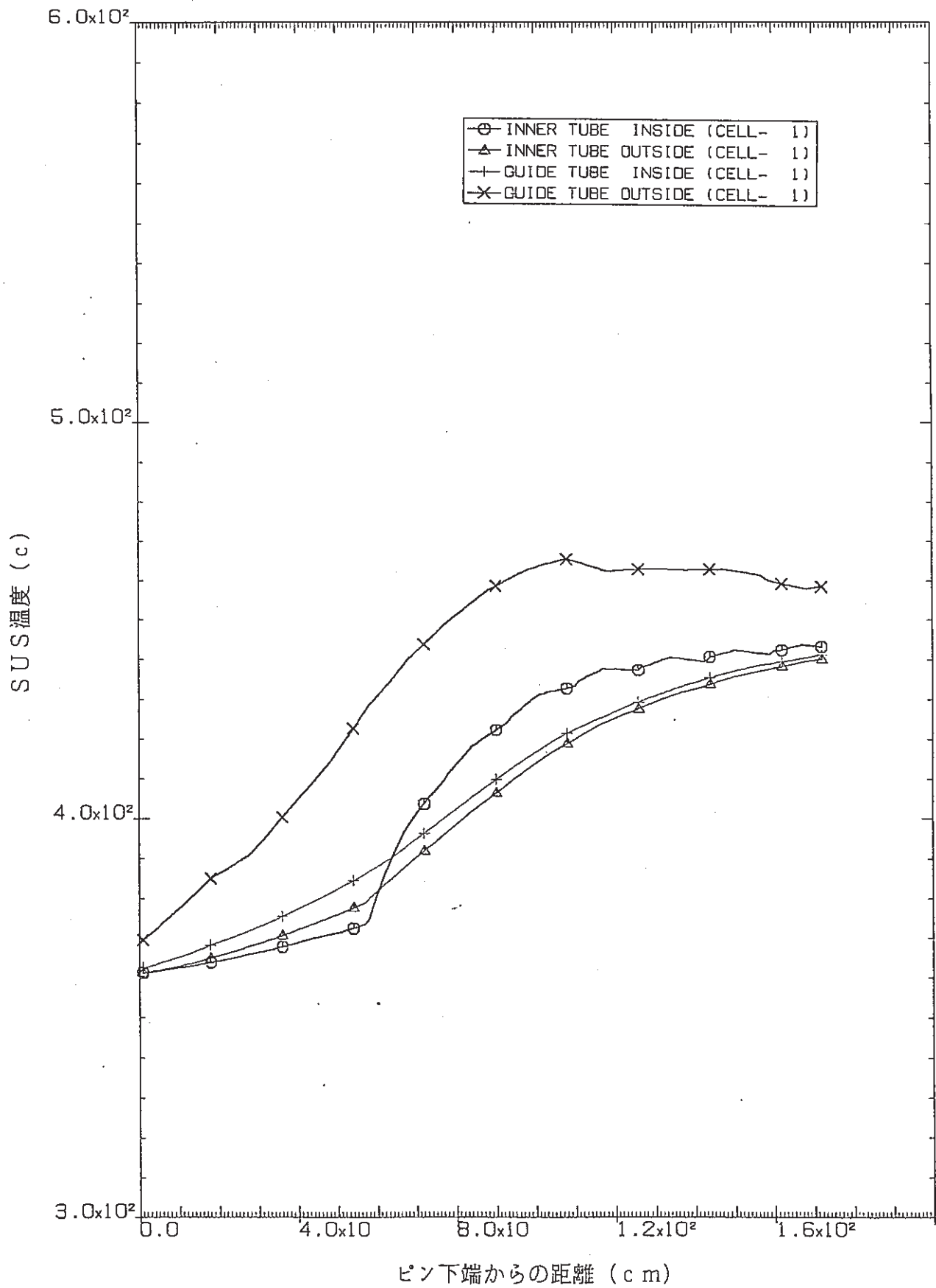


PIN : 1 - 37	CELL : 1 - 18 (保護管)
SUBCHANNEL : 1 - 60 (保護管内)	: 1 - 18 (案内管)
: 1 - 18 (アニュラス部)	GAP : 1 - 96 (保護管内)
: 1 - 18 (案内管外侧)	: 1 - 18 (アニュラス部)

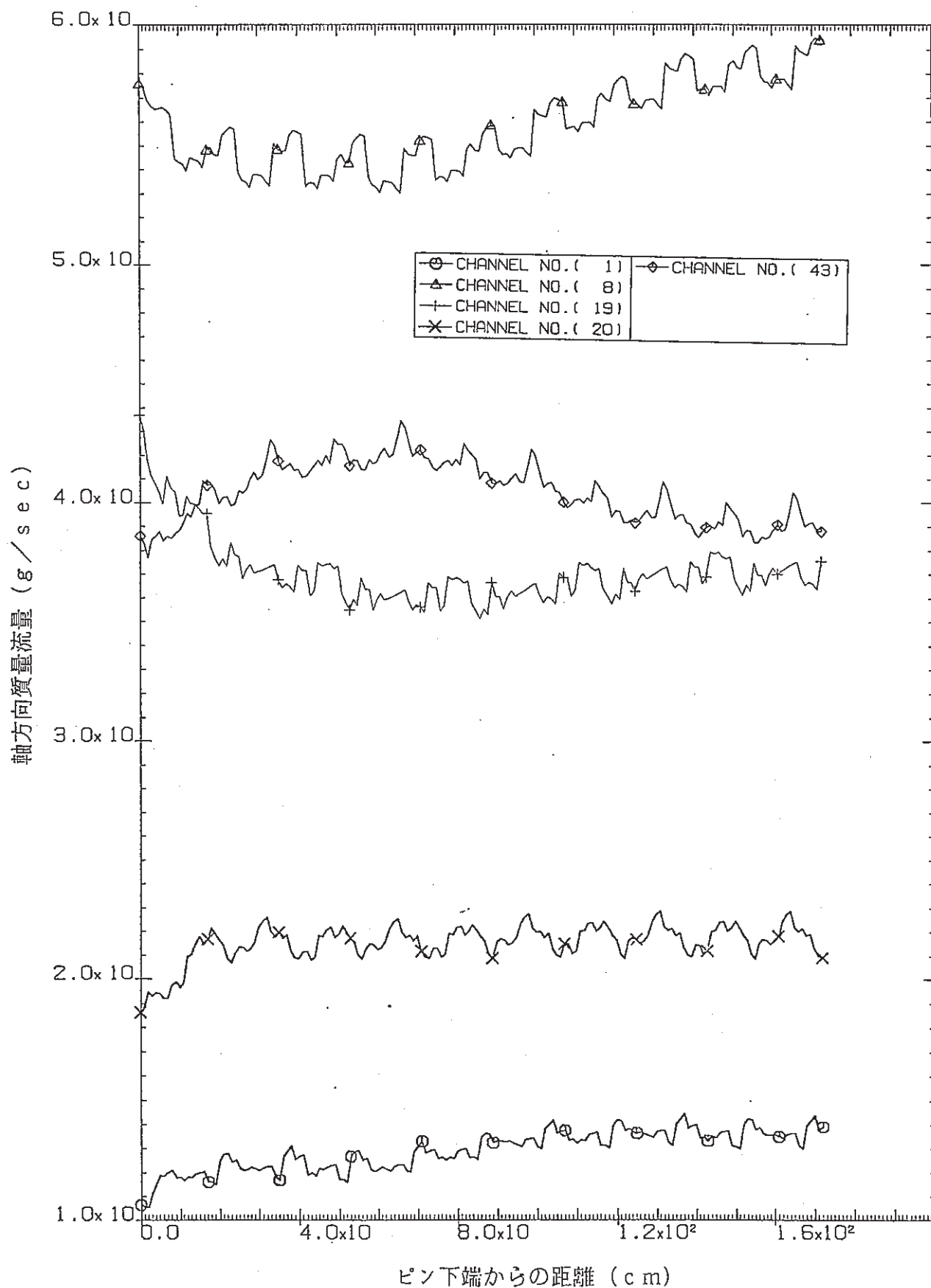
付図A-1 ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号
(同芯円状配列37本バンドル)



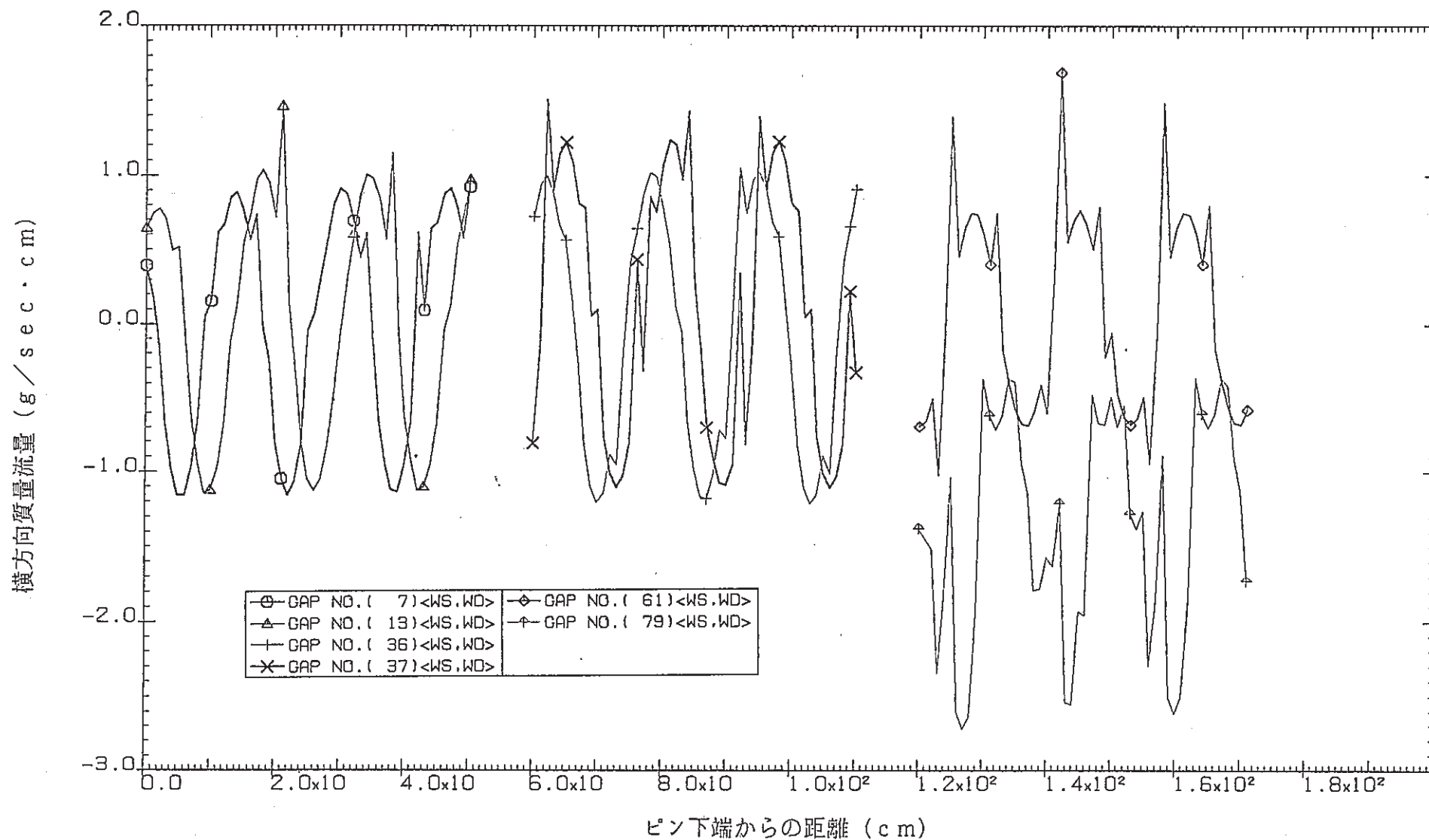
付図A-2 冷却材温度軸方向分布(同芯円状配列37本バンドル)



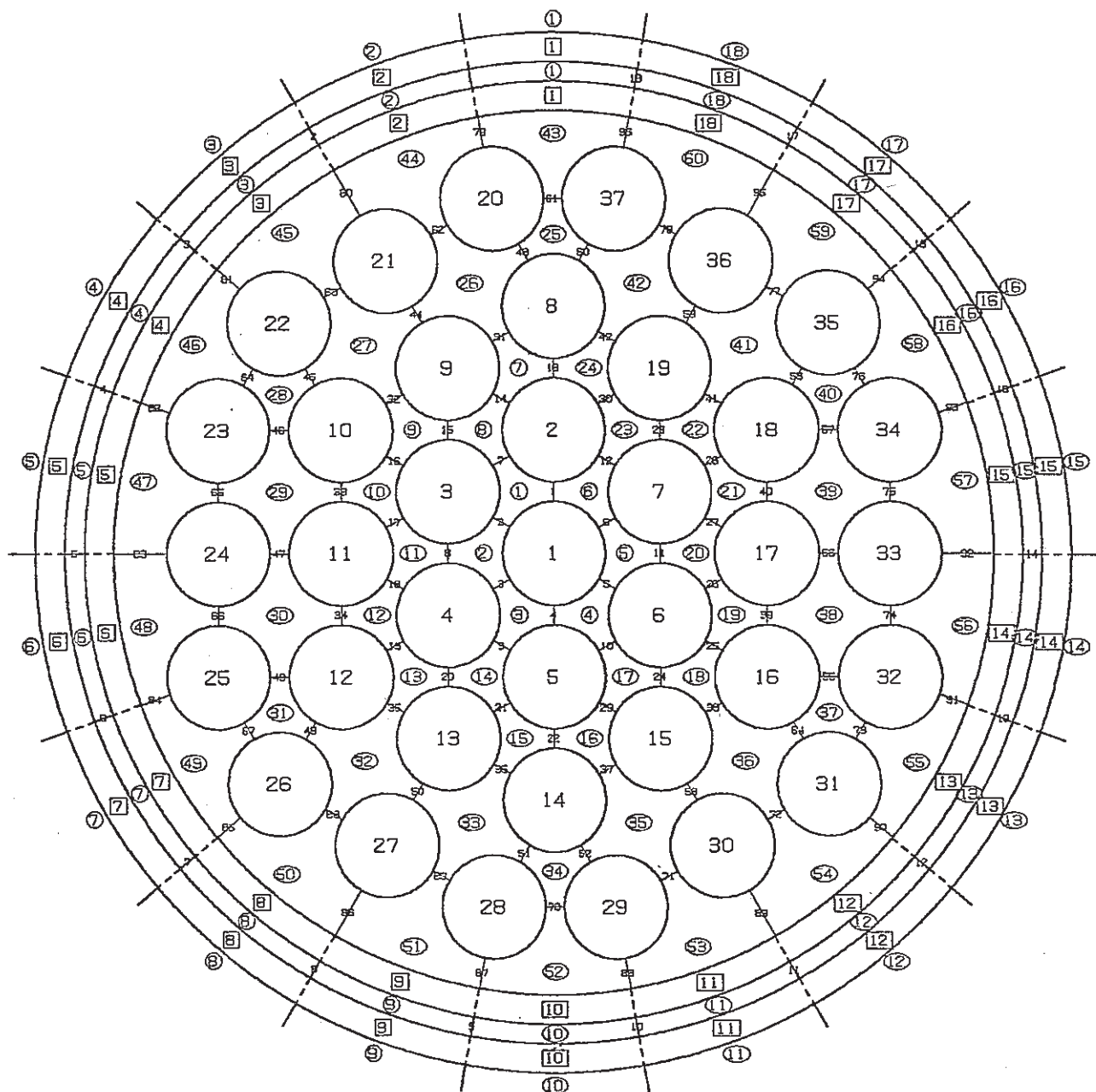
付図A-3 SUS 温度軸方向分布(同芯円状配列37本バンドル)



付図A-4 サブチャンネル軸方向質量流量の軸方向分布
(同芯円状配列37本バンドル)

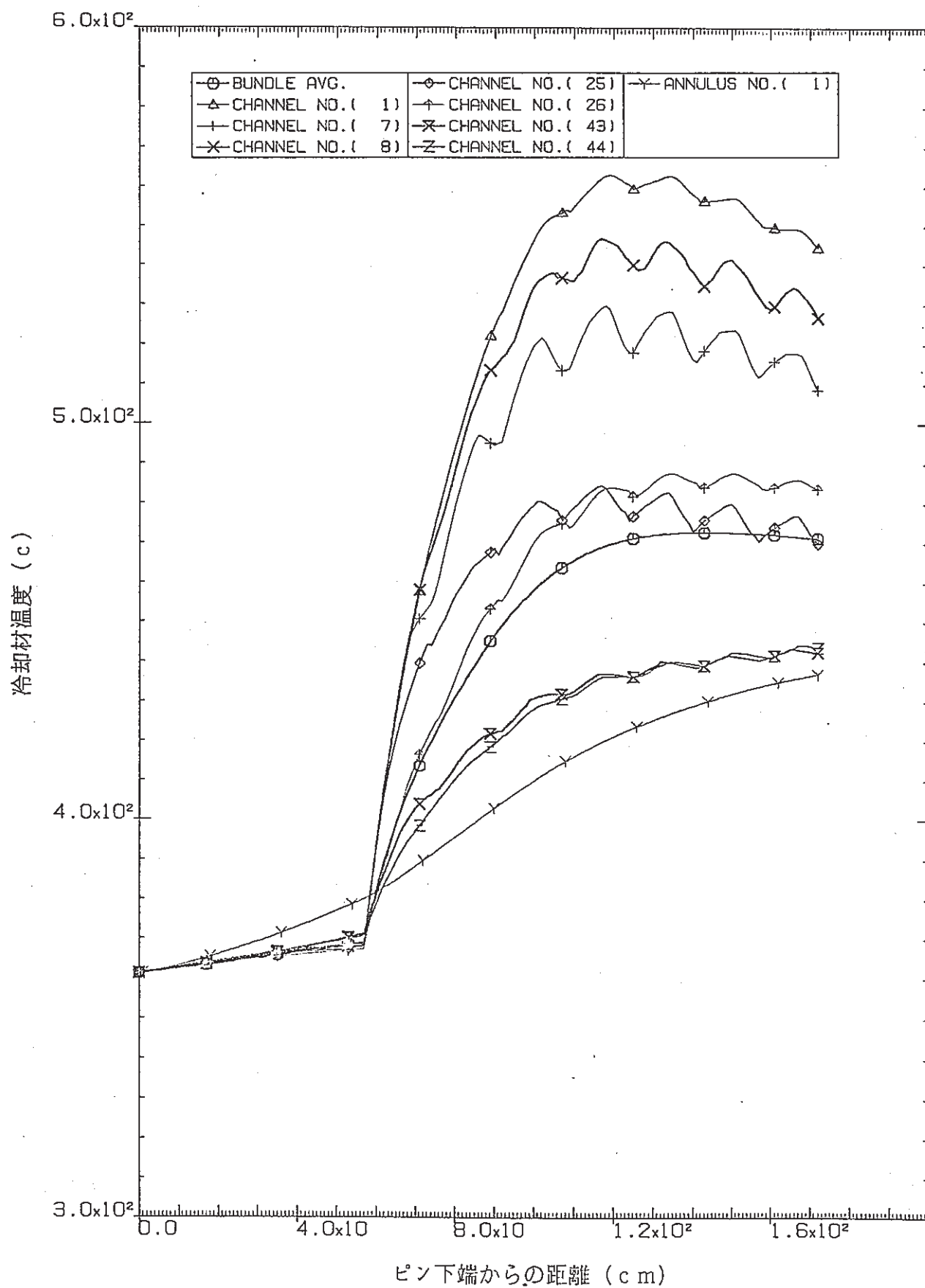


付図A-5 サブチャンネル間横方向質量流量の軸方向分布
(同芯円状配列37本バンドル)

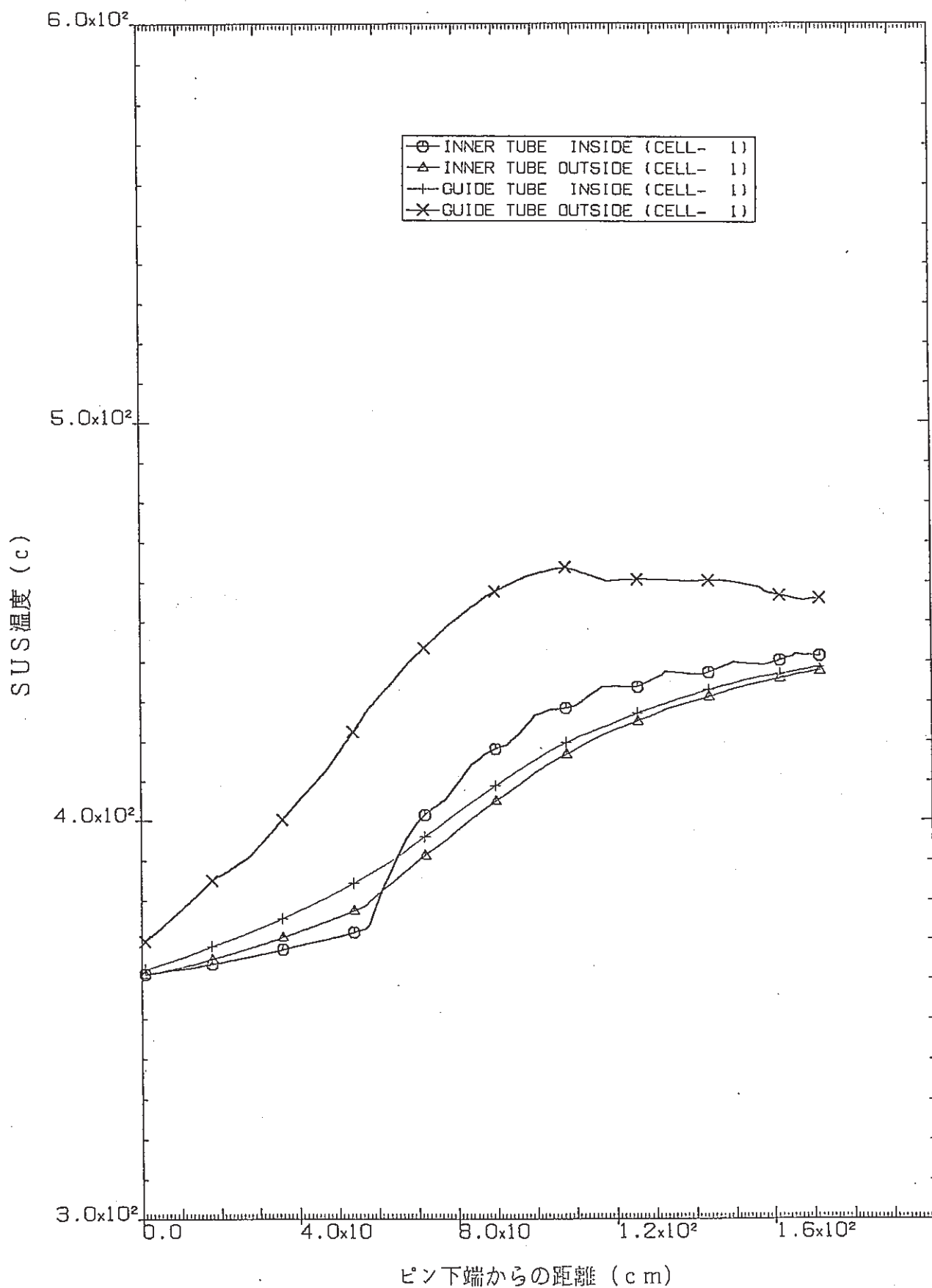


PIN : 1 - 37	CELL : 1 - 18 (保護管)
SUBCHANNEL : 1 - 60 (保護管内)	: 1 - 18 (案内管)
: 1 - 18 (アニユラス部)	GAP : 1 - 96 (保護管内)
: 1 - 18 (案内管外側)	: 1 - 18 (アニユラス部)

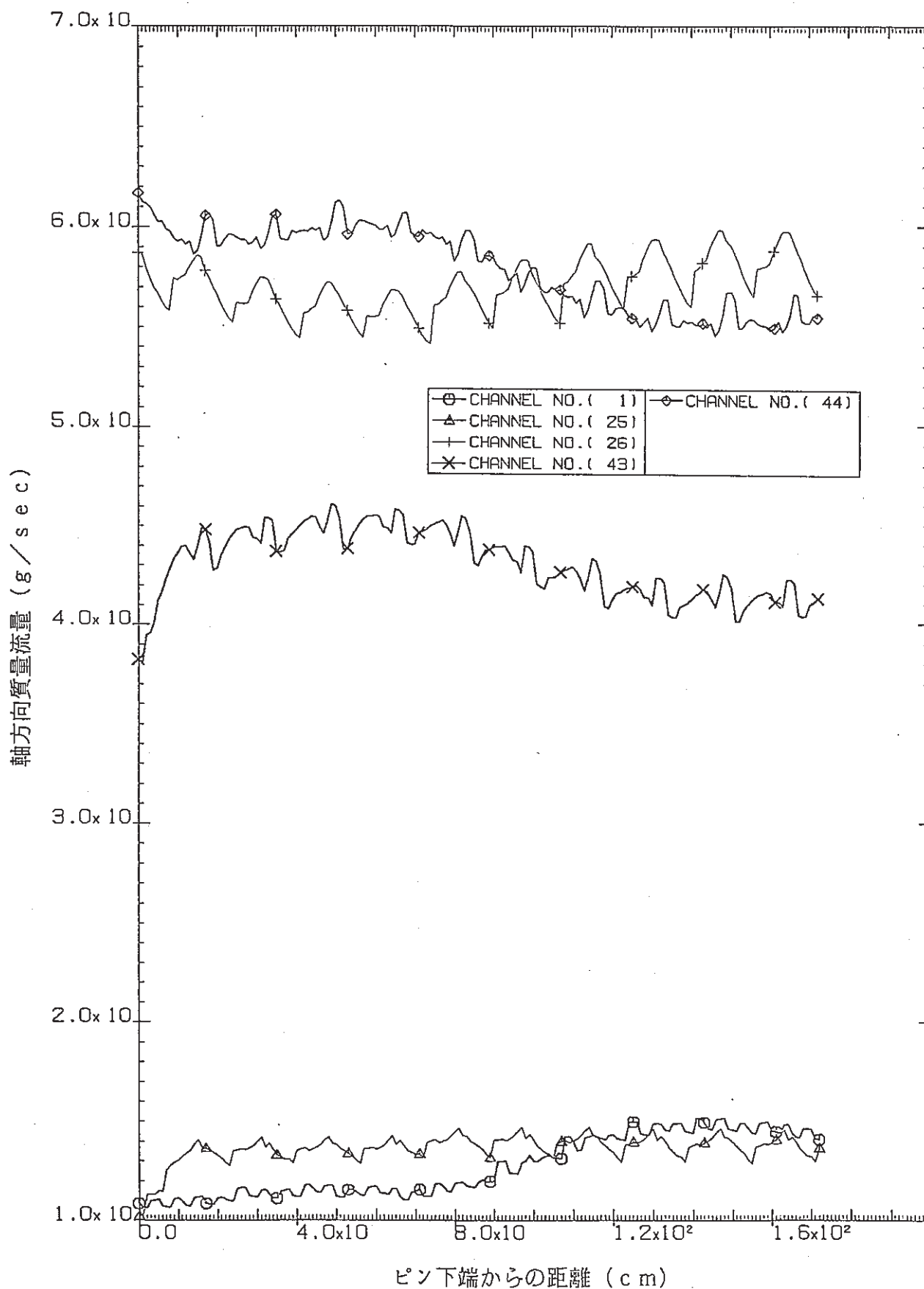
付図A-6 ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号
(内層19本正三角形配列37本バンドル)



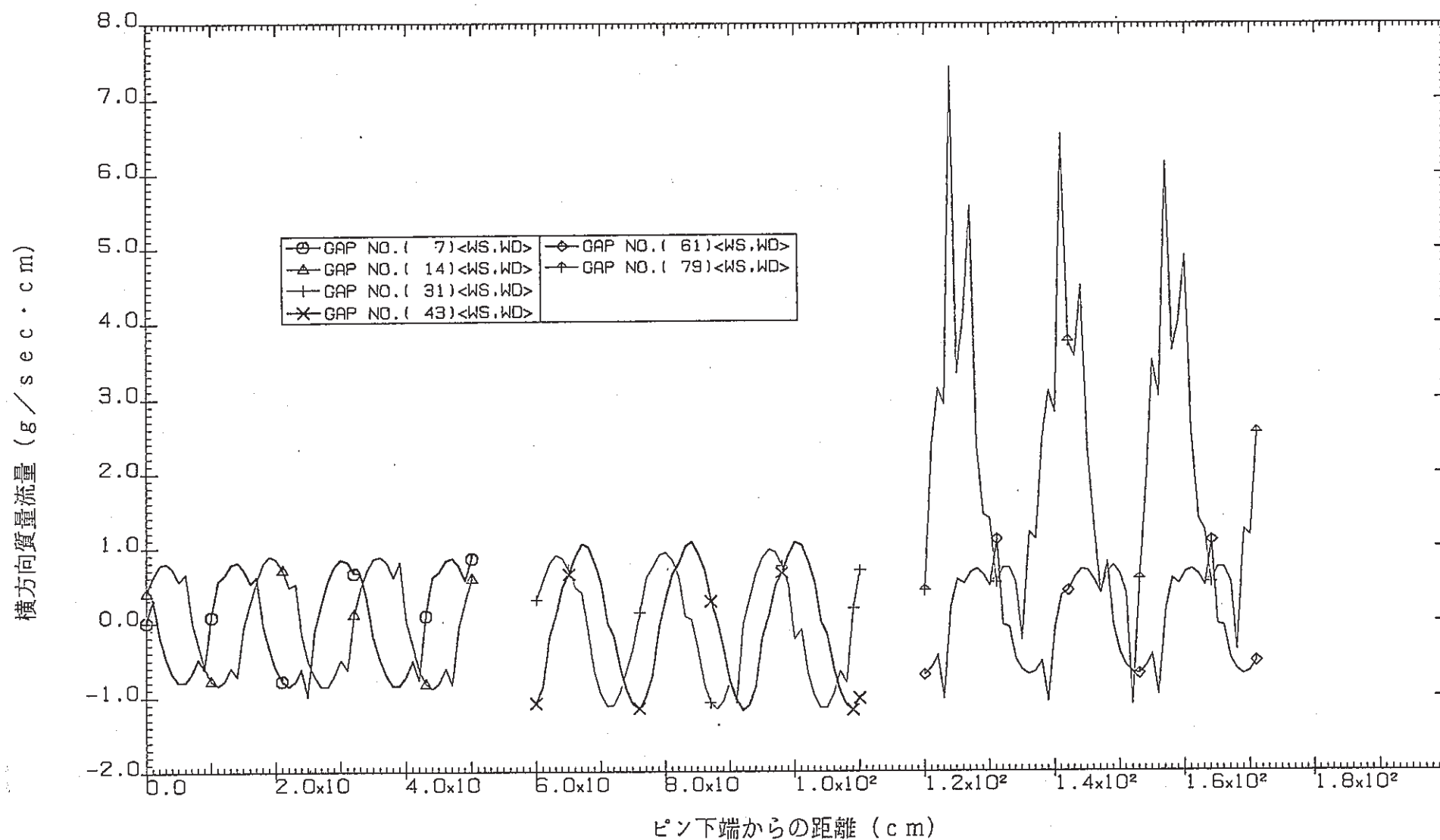
付図A-7 冷却材温度軸方向分布(内層19本正三角形配列37本バンドル)



付図A-8 SUS 温度軸方向分布(内層19本正三角形配列37本バンドル)



付図A-9 サブチャンネル軸方向質量流量の軸方向分布
(内層19本正三角形配列37本バンドル)

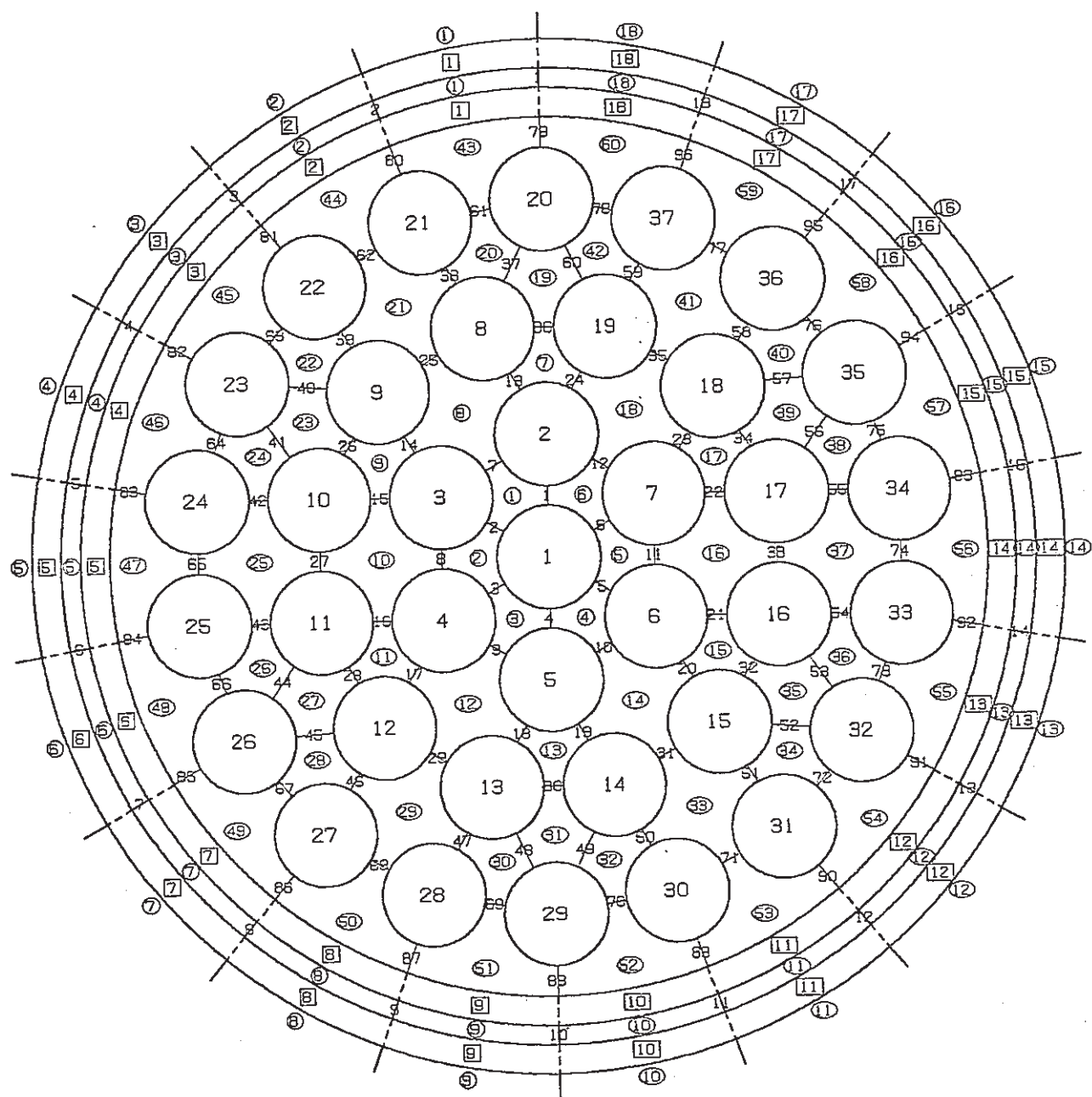


付図A-10 サブチャンネル間横方向質量流量の軸方向分布
(内層19本正三角形配列37本バンドル)

付録B 出口冷却材温度高温化に関連して実施した解析結果の詳細

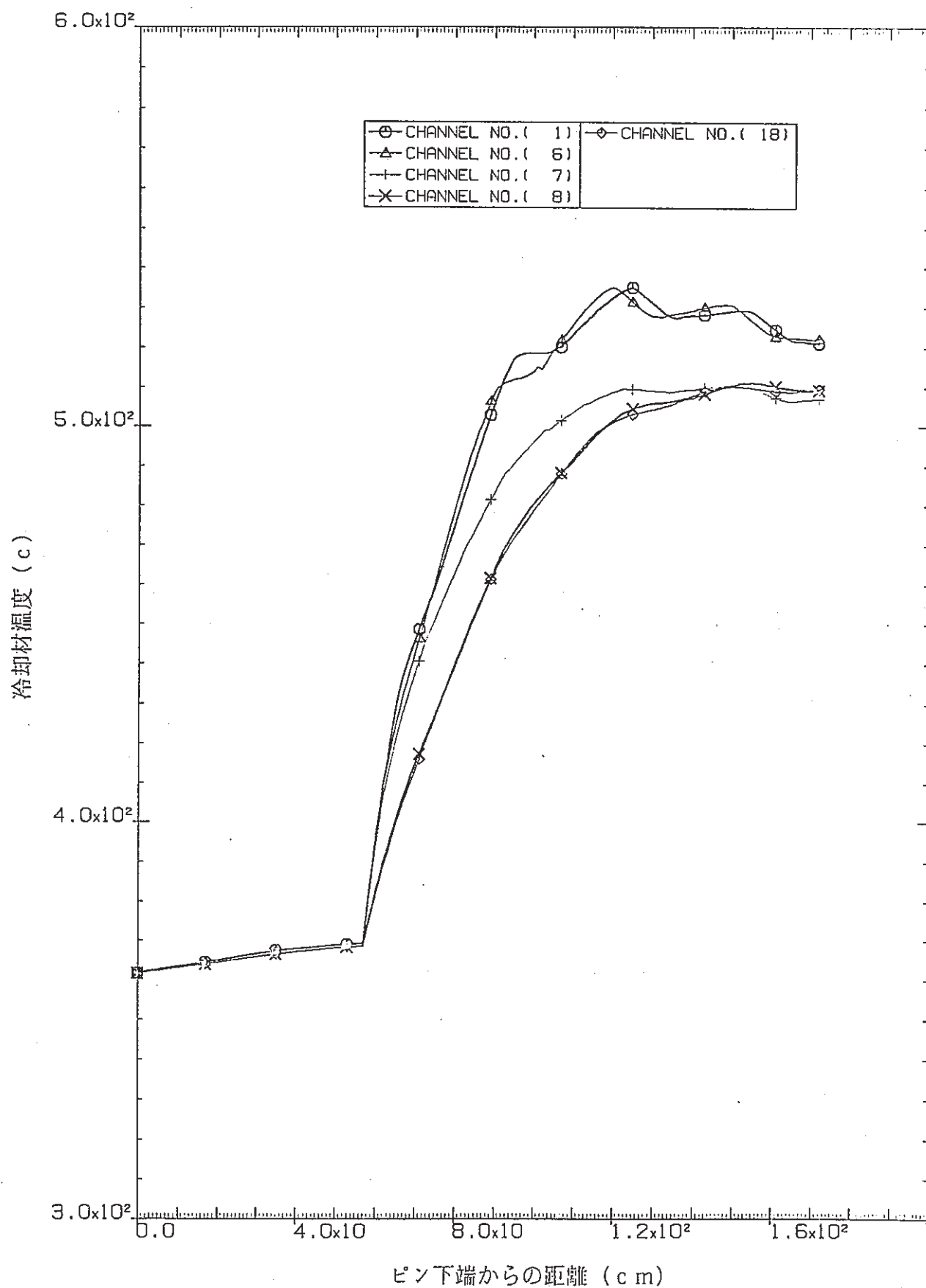
概要において述べたように、付録Bとして、本文第4章『出口冷却材温度高温化の検討』においては除外した解析結果の詳細(**VORTEX**コードのプロッター出力図)を、付図B-1から付図B-10として収録した。

付図B-1から付図B-5までは、本文第4.3表ケース2の、また付図B-6から付図B-10までは、同表ケース5の解析結果である。本文第4.6表に示した被覆管周方向最大温度差は、これらの図より読み取ったものである。

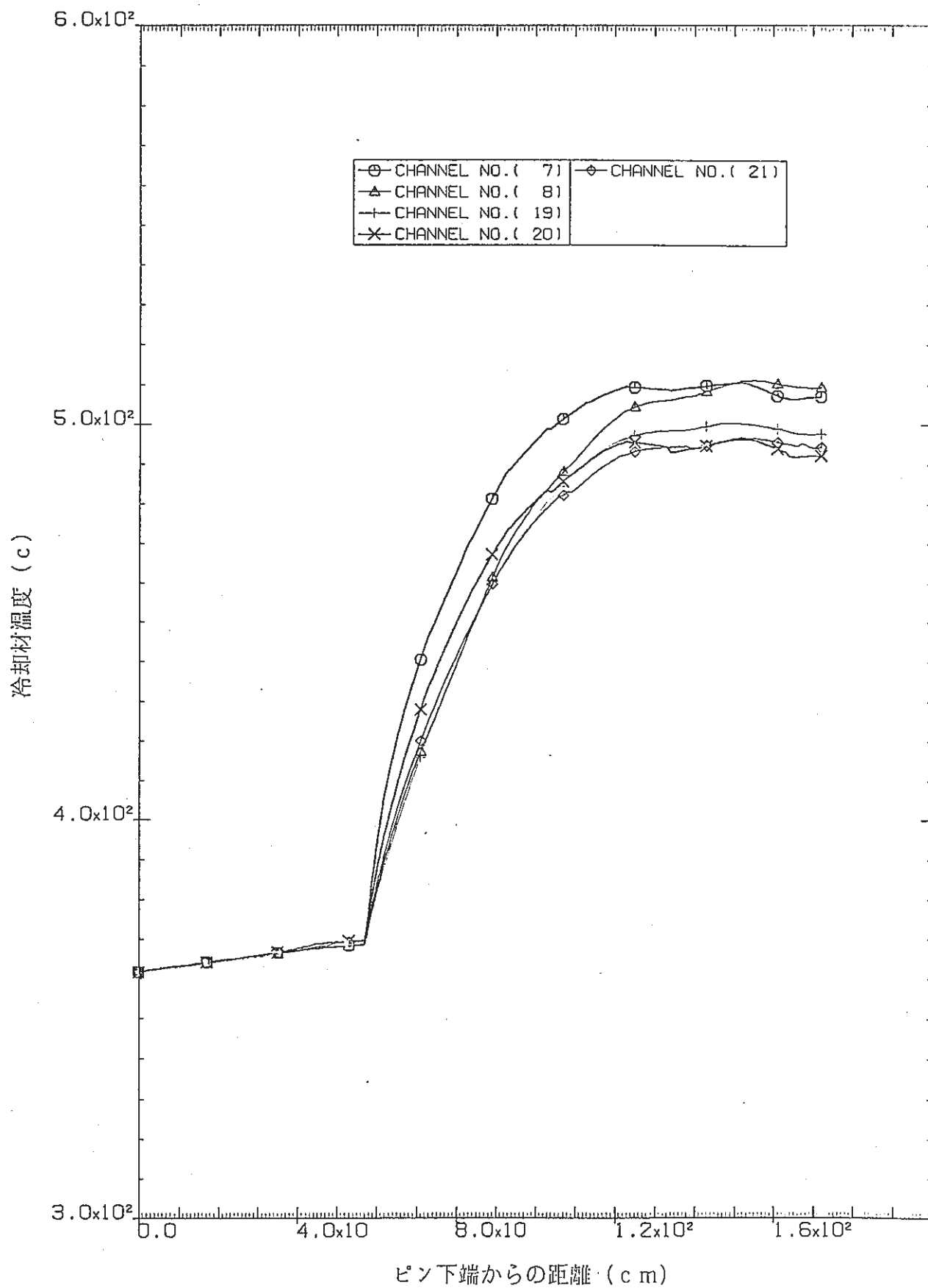


PIN : 1 - 37	CELL : 1 - 18 (保護管)
SUBCHANNEL : 1 - 60 (保護管内)	: 1 - 18 (案内管)
: 1 - 18 (アニュラス部)	GAP : 1 - 96 (保護管内)
: 1 - 18 (案内管外側)	: 1 - 18 (アニュラス部)

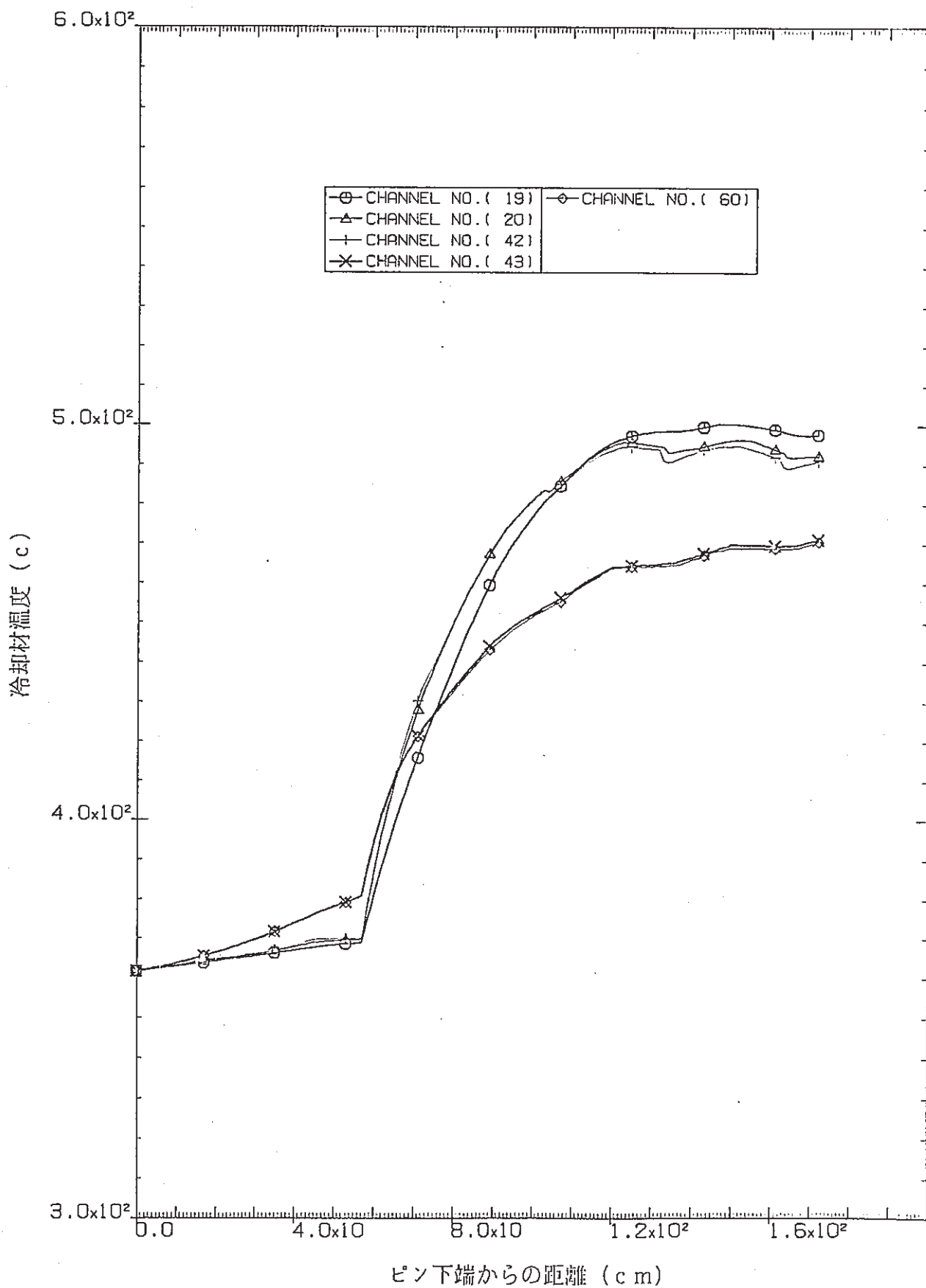
付図B-1 ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号
(同芯円状配列37本バンドル)



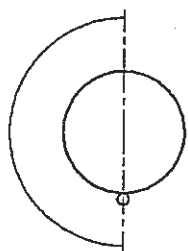
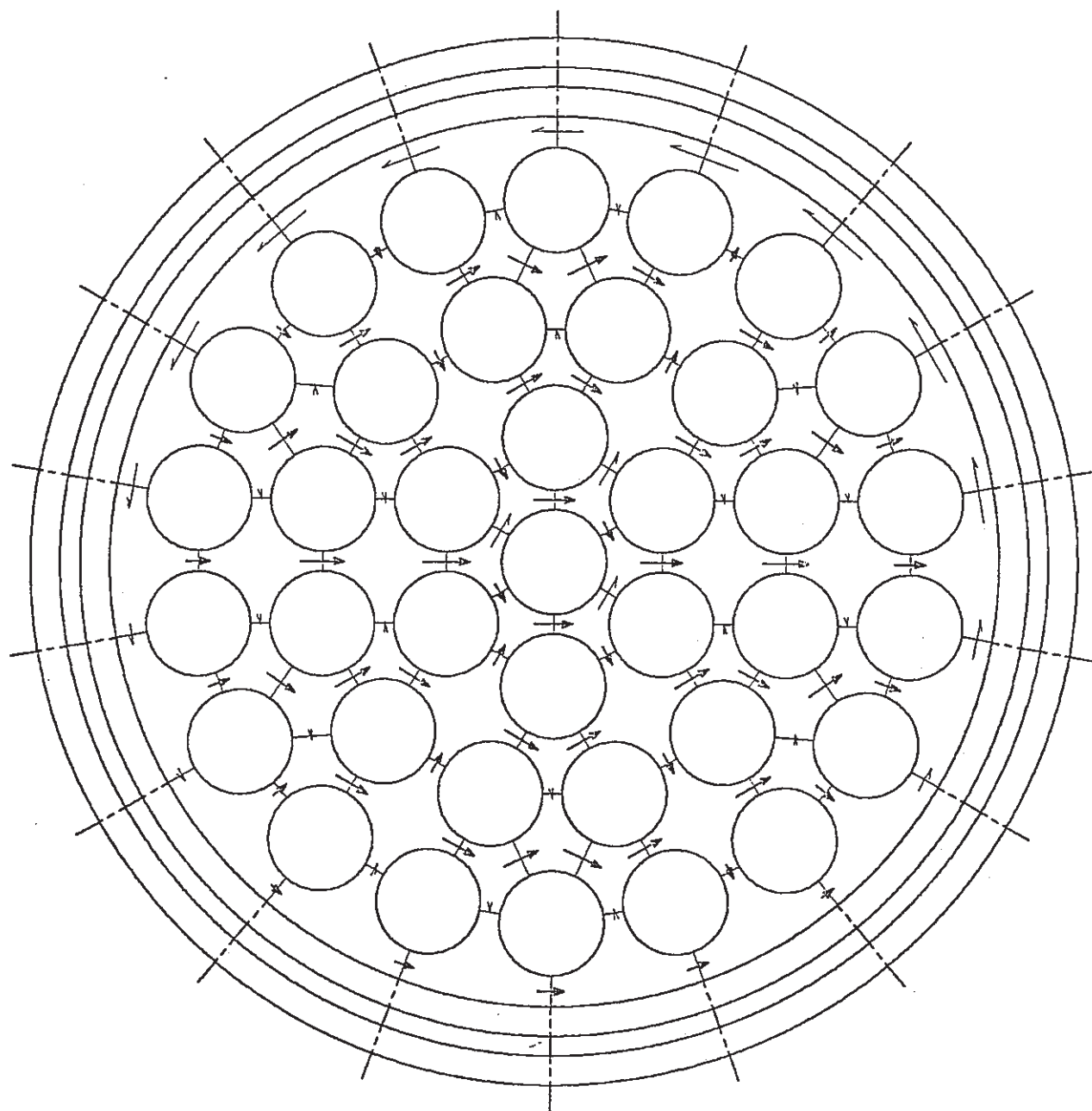
付図B-2 第2層ピン(#2)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(同芯円状配列37本バンドル)



付図B-3 第3層ピン(#8)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(同芯円状配列37本バンドル)



付図B-4 第4層ピン(#20)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(同芯円状配列37本バンドル)



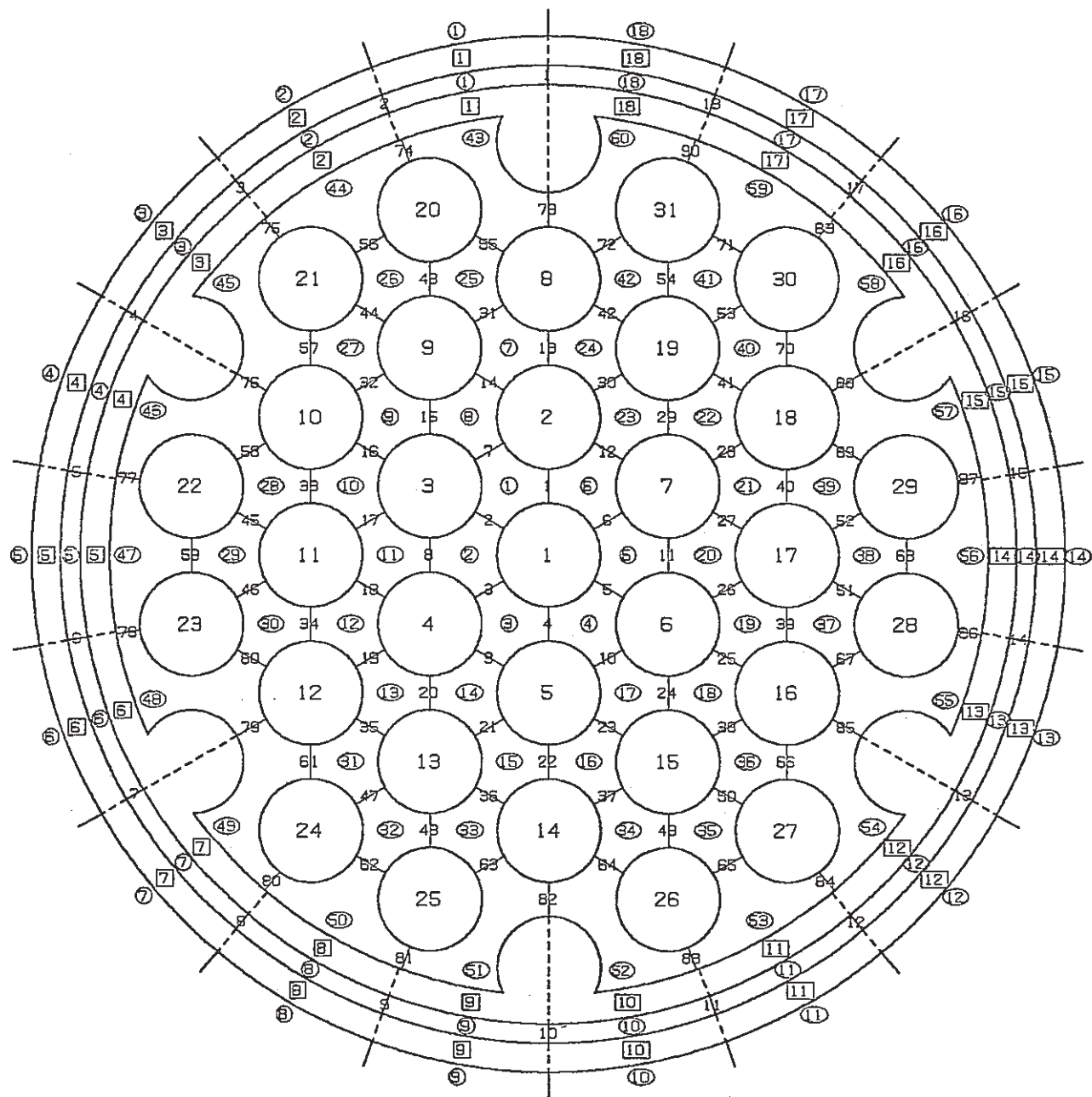
ワイヤ位置：180.0（度）

← : sweeping crossflow

— : diversion crossflow

(1 cm長さが1.0g/sec・cmに相当)

付図B-5 冷却材最高温度高さ位置における横向流の方向と大きさ
(同芯円状配列37本バンドル)



PIN : 1 - 31

SUBCHANNEL : 1 - 60 (保護管内)

: 1 - 18 (アニュラス部)

: 1 - 18 (案内管外側)

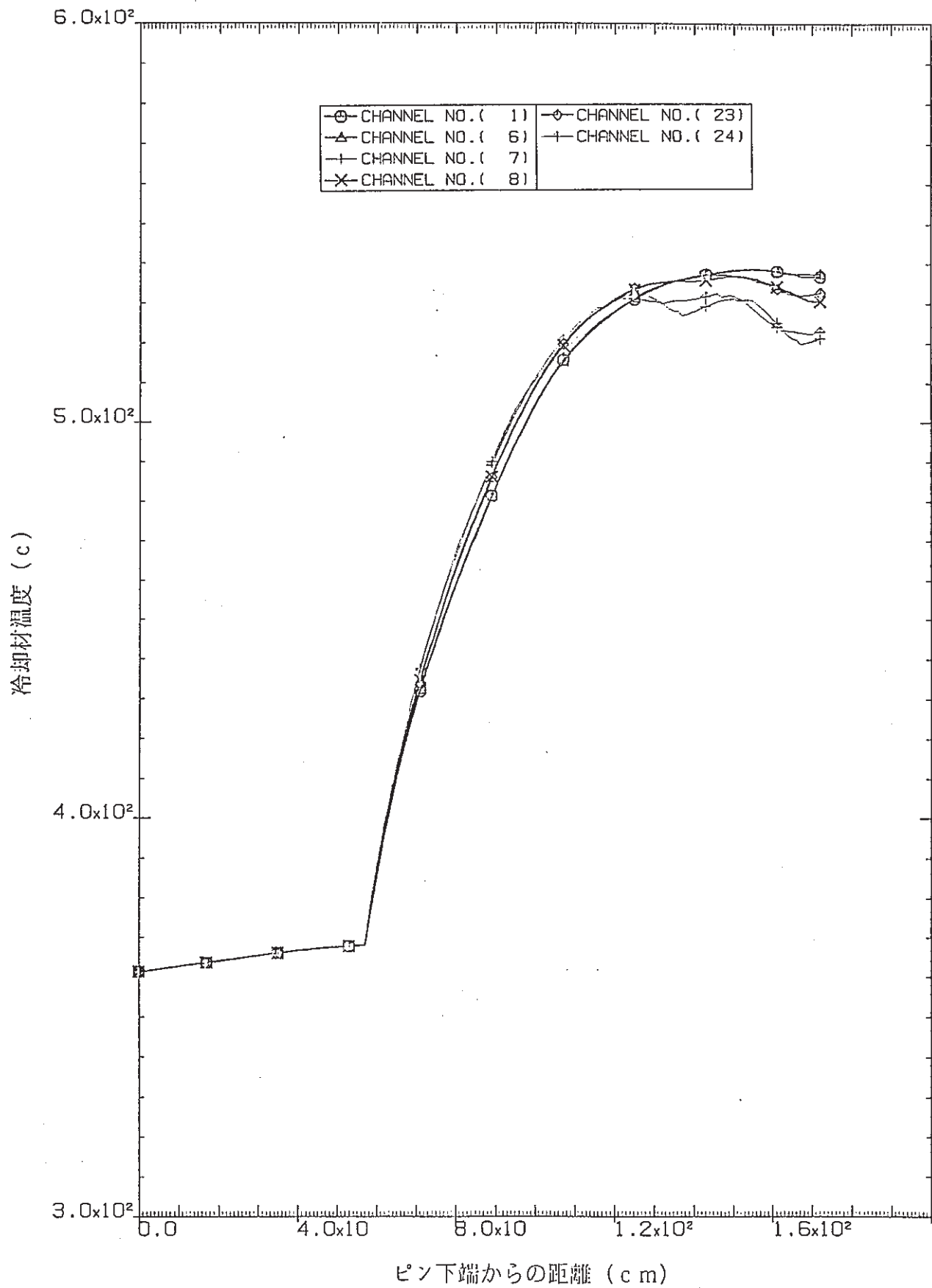
CELL : 1 - 18 (保護管)

: 1 - 18 (案内管)

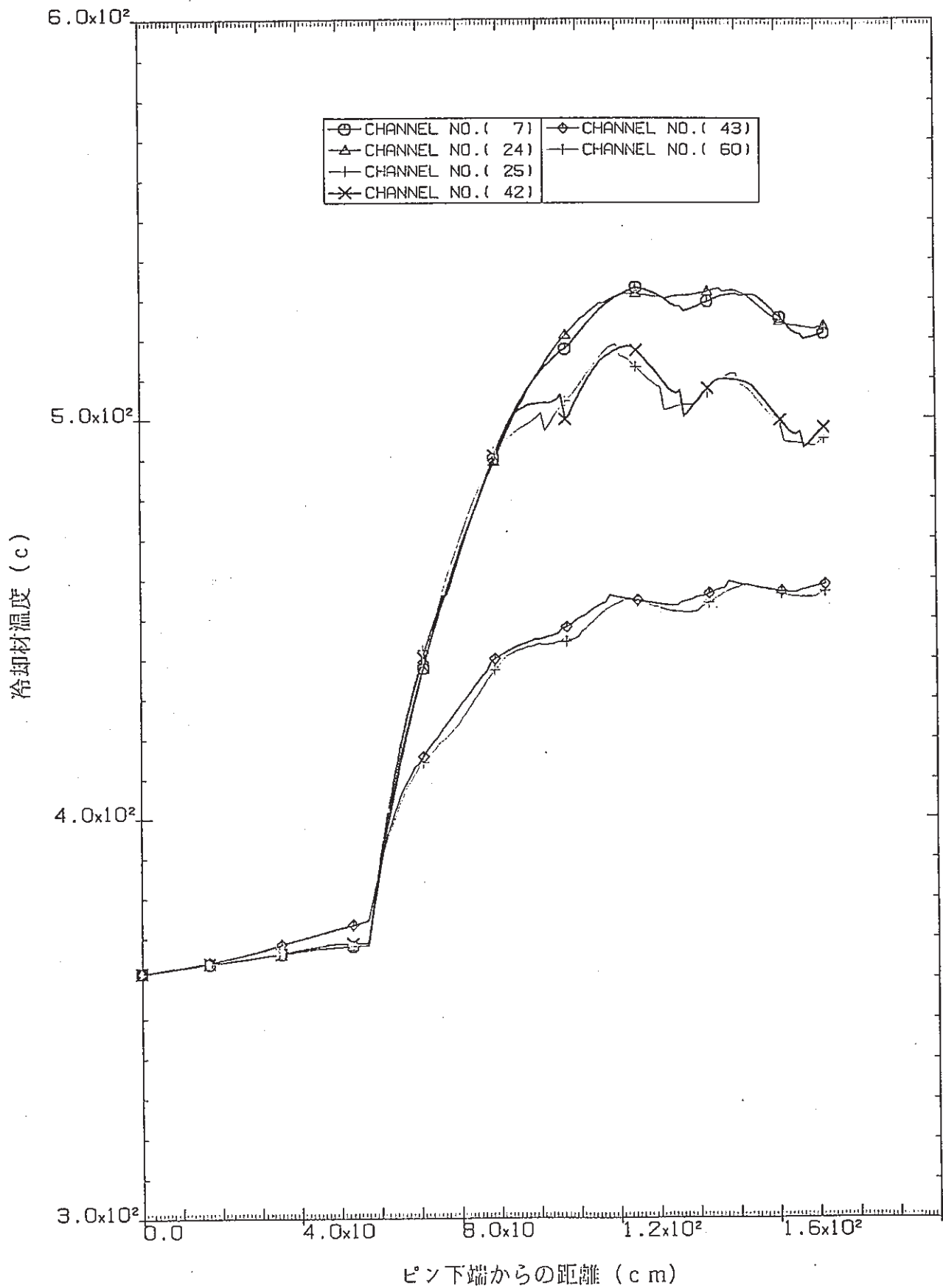
GAP : 1 - 90 (保護管内)

: 1 - 18 (アニュラス部)

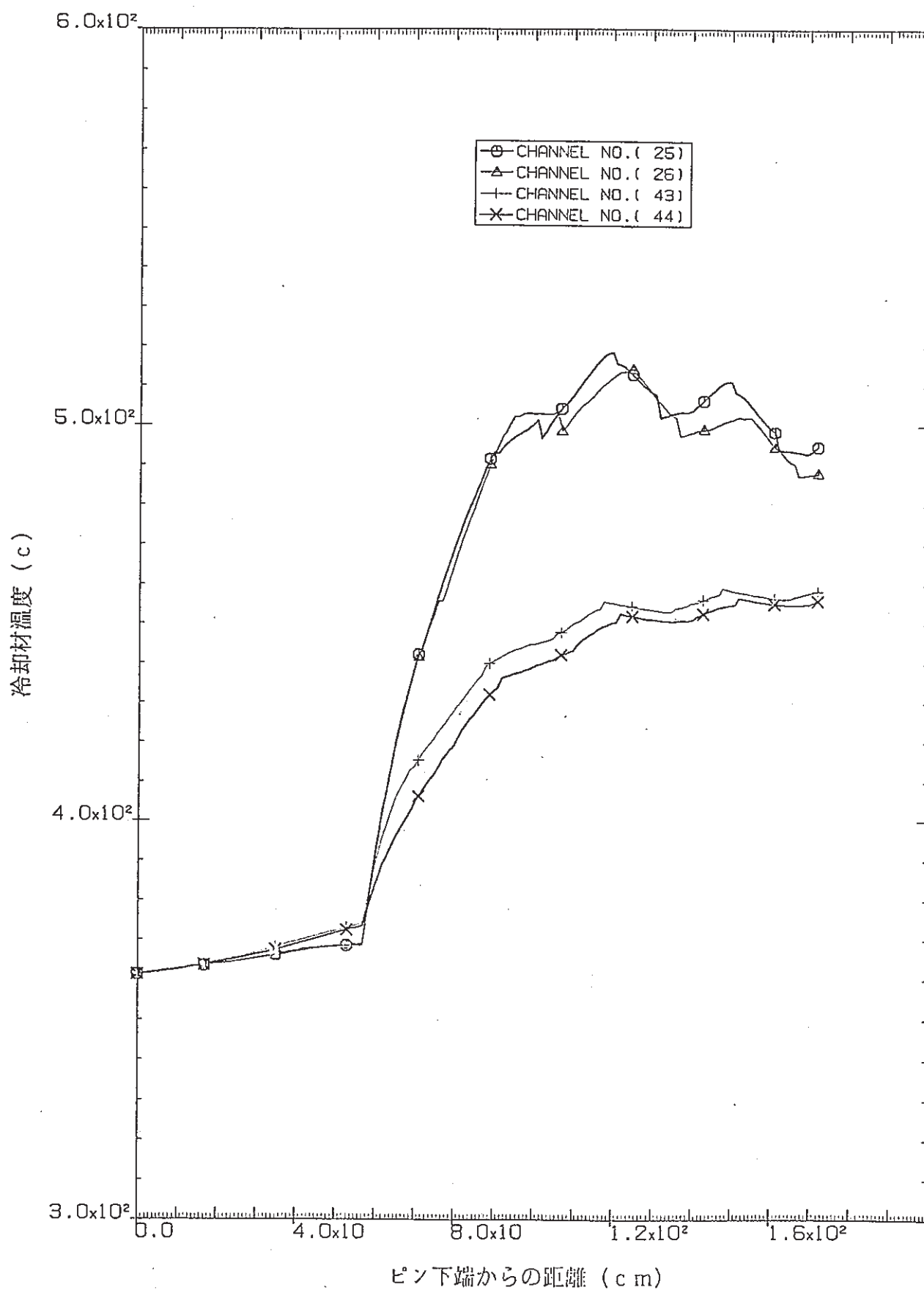
付図B-6 ピン、セル、サブチャンネル、およびギャップの番号
(正三角形配列31本バンドル)



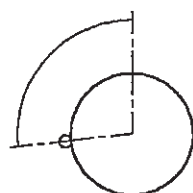
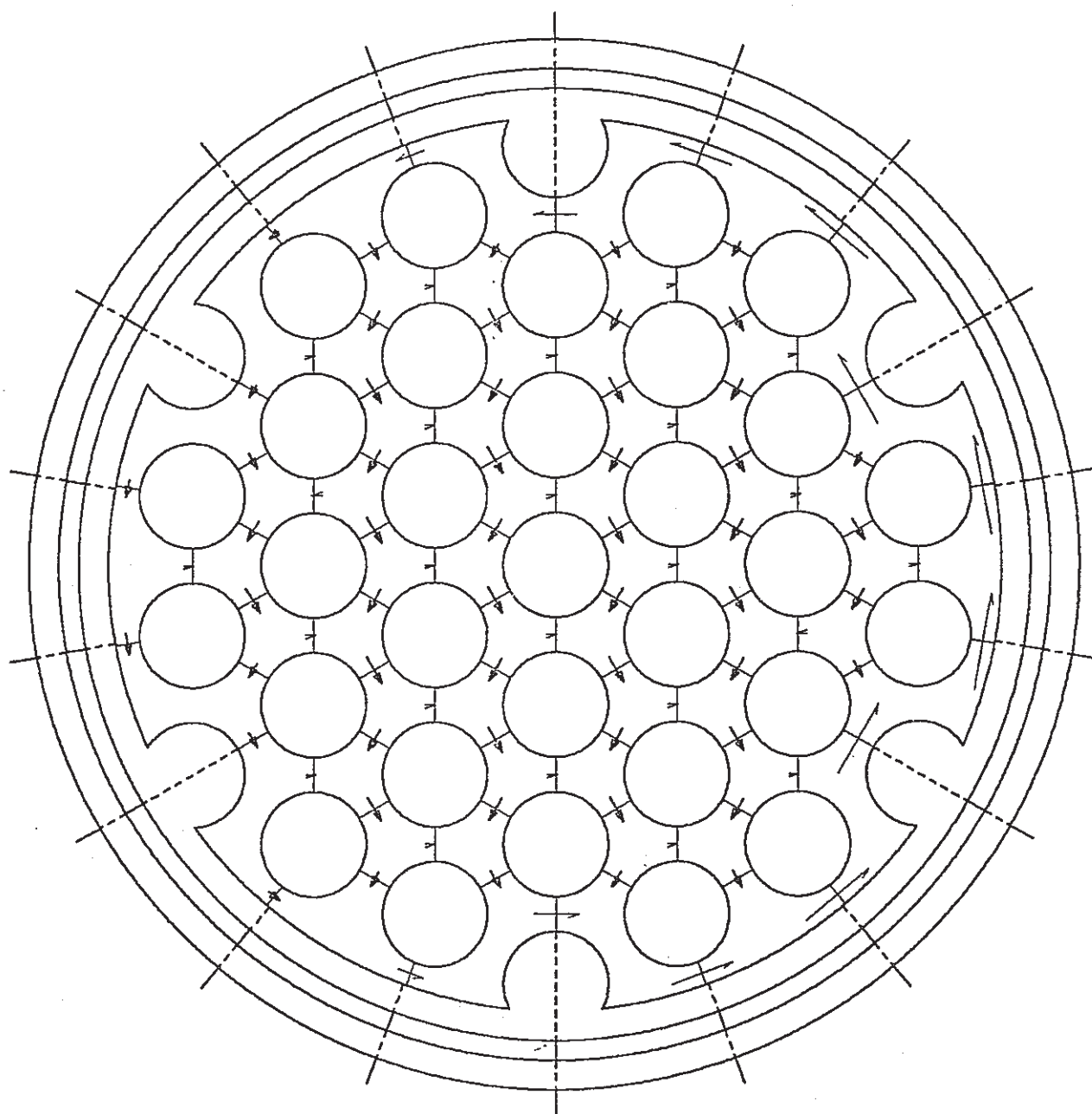
付図B-7 第2層ピン(#2)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(正三角形配列31本バンドル)



付図B-8 第3層ピン(#8)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(正三角形配列31本バンドル)



付図B-9 第4層ピン(#20)を囲むサブチャンネルの冷却材温度軸方向分布
(正三角形配列31本バンドル)



← : sweeping crossflow

← : diversion crossflow

(1 cm長さが2.0 g/sec・cmに相当)

ワイヤ位置 : 96.0 (度)

付図B-10 冷却材最高温度高さ位置における横向流の方向と大きさ
(正三角形配列31本バンドル)

付録C 周辺細径ワイヤ仕様の検討

最外層の吸収ピンのスペーサワイヤ径を、内層ピンのそれよりも細くし、ピン間ギャップ幅を保つために被覆管外径を全てのピンについて大きくした『周辺細径ワイヤ仕様のピンバンドル』の熱流動特性解析を、第4章におけると同様、**SCANNER**コードおよび**VORTEX**コードを用いて行った。

周辺細径ワイヤ仕様のピンバンドルでは、保護管内壁に面する最外層サブチャンネルの流路面積が低減され、流量が抑制されるので、バンドル中心付近でピークとなる径方向温度勾配が小さくなり、必要最小流量の低減が期待される。付表C-1に示したように、冷却材温度径方向ピーキング係数は、最外層ピンのワイヤ径を小さくするほど小さくなり、必要最小流量が低減されるとの、予想通りの結果が得られた。しかし、必要最小流量の低減割合は小さく、それに伴う冷却材出口温度の上昇効果は微々たるものであることが分かった。このように、冷却材出口温度高温化の点で余り効果の無い原因は、燃料集合体とは異なり、制御棒ではバイパス部が存在することにある。即ち、周辺細径ワイヤ仕様とすると、周辺部での無駄流量は確かに抑制されるが、バンドル部の流路抵抗の増加することで、バイパス部への流量配分比が増加してしまうからである。

したがって、冷却材出口温度高温化の点で、『周辺細径ワイヤ仕様のピンバンドル』採用のメリットは無いと結論される。

付表C-1 周辺細径ワイヤ仕様の検討における解析条件と解析結果

項目	ケース2	ケースI	ケースII	ケース5	ケースIII	ケースIV
流量(kg/sec)	3.21	3.16	3.10	3.99	3.93	3.88
ピン本数(-)	37	37	37	31	31	31
ピン外径(mm)	φ20.2	φ20.3	φ20.4	φ22.0	φ22.1	φ22.2
保護管外径(mm)	φ152	φ152	φ152	φ152	φ152	φ152
保護管内径(mm)	φ150.1	φ150.0	φ150.0	φ150.0	φ150.0	φ150.0
ワイヤ径(内部/周辺) (mm)	φ1.5 /φ1.5	φ1.5 /φ1.1	φ1.5 /φ0.6	φ1.5 /φ1.5	φ1.5 /φ1.2	φ1.5 /φ0.9
巻付けピッチ(mm)	300	300	300	300	300	300
圧損(g/cm ²)	4.53	4.55	4.61	10.25	10.20	10.19
バンドル部流量(kg/sec)	1.77	1.71	1.65	1.69	1.63	1.58
バイパス部流量(kg/sec)	1.44	1.45	1.46	2.30	2.29	2.29
バンドル部渦拡散率比	0.274	0.271	0.267	0.273	0.270	0.267
バイパス部渦拡散率比	0.384	0.383	0.384	0.445	0.445	0.445
バンドル部流速(cm/sec)	35.7	35.4	35.0	47.2	46.4	45.8
バイパス部流速(cm/sec)	49.0	49.0	49.3	77.9	77.8	77.8
バンドル部Re数	8.3×10 ³	8.1×10 ³	7.8×10 ³	8.2×10 ³	8.0×10 ³	7.5×10 ³
バイパス部Re数	2.0×10 ⁴	2.0×10 ⁴	2.1×10 ⁴	3.2×10 ⁴	3.2×10 ⁴	3.2×10 ⁴
冷却材出口温度(BOC)(°C)	487	489	490	468	469	470
冷却材出口温度(EOC)(°C)	450	451	452	437	437	438
隣接集合体よりの入熱量 積分値(BOC) (kW)	68	66	63	101	99	97
冷却材最高温度高さ(cm)	67	67	67	100	100	100
冷却材最高温度S/C# /径方向ピーキング係数	#1 1.37	#1 1.35	#1 1.33	#3 1.39	#3 1.37	#3 1.34
冷却材最高温度ノミナル値 /ホットスポット値(°C)	536 644	536 644	536 644	539 649	539 650	538 649
被覆管内面最高温度高さ(cm)	62	62	62	99	99	78
内面最高温度S/C#/ピン#	#6,#7	#6,#7	#6,#7	#3,#5	#3,#5	#17,#15
被覆管最高温度ノミナル値 /ホットスポット値(°C)	538 650	538 650	538 650	539 650	539 650	539 650

注記) ケース2およびケース5は、本文第4章に示した、全てのワイヤ径をφ1.5としたもので、比較のために示した。