

JAERI-M
8185

ROSA-III試験のためのBWR／6
LOCA解析

1979年3月

北口 秀美*・鈴木 光弘・傍島 真

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

ROSA-III試験のためのBWR/6 LOCA解析

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

北口 秀美*・鈴木 光弘・傍島 真

(1979年2月22日受理)

実炉(BWR/6)のLOCA解析を行い、あらかじめLOCA過程に及ぼす各種パラメータの効果を調べ、大きな影響を及ぼす因子や、炉心が熱的に厳しくなるような因子の効き方について調べておくことは、ROSA-III実験条件を決める上で必要な情報を与える。

本報では上記の観点から、前報のBWR/6に対するインプット値を再度検討した。使用した解析コードはRELAP-4Jである。検討の対象としたのは、崩壊熱出力の値、 UO_2 と被ふく管の物性値、ギャップの物性値、ポンプ特性曲線、放出係数 C_D 、ヒートスラブ、下部プレナムの流体容積、破断口位置の高さである。ECCSの効果についても検討した。更に、安全評価用(EM)コードとの違いが解析結果に及ぼす影響についても検討した。

解析の結果、ギャップの物性値の違いがLOCA全体のふるまい及び、燃料棒表面温度に対し、大きな影響を与えていることがわかった。なお、ROSA-IIIの模擬燃料棒(電気ヒーター)にはギャップが存在しないが、その熱出力を制御することはできるので、その制御に関し実炉条件を模擬する上で更に綿密な検討が必要であると考えられる。

* 東京芝浦電気株式会社

LOCA analysis of BWR/6 for the ROSA-III test

Hidemi KITAGUCHI^{*}, Mitsuhiro SUZUKI and Makoto SOBAJIMA

Reactor Safety Division,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 22, 1979)

For the experimental conditions of ROSA-III test, it is useful to examine LOCA phenomena in an actual boiling water reactor (BWR/6) with computer code RELAP-4J. For the purpose, the effect of parameters on the LOCA phenomena were studied, including decay heat, physical properties of UO_2 and cladding, physical properties of gap, pump characteristic curves, discharge coefficient C_D , heat slab, fluid volume and height of break location. Furthermore, the effects of ECC on core cooling and different computer code (RELAP-4EM (Mod 3) as another evaluation code) on the analytical results were also examined. In conclusion, the physical properties of gap influence LOCA phenomena and core cooling most sensitively. The power control in the ROSA-III test having electrical heater rods thus must be studied in detail, in order to simulate the heat release from fuel rods to coolant in LOCA phenomena of BWR/6.

Keywords: BWR, LOCA, ECCS, Core Cooling Analysis, RELAP-4J Code,
Parameter Survey, Gap Conductance, Heat Slab, Decay Heat,
ROSA-III test

* Tokyo Shibaura Electric Comp.

目 次

1. はじめに.....	1
2. 再循環系ポンプ吸込み側破断の解析.....	1
2.1 計算パラメーター.....	1
2.2 計算ケース.....	3
2.3 解析結果.....	5
2.3.1 全ケースの比較.....	5
2.3.2 ヒートスラブの効果.....	6
2.3.3 二相流放出係数 C_D の効果.....	6
2.3.4 下部プレナムの流体容積の効果.....	7
2.3.5 UO_2 及び被ふく管の比熱の効果.....	7
2.3.6 崩壊熱出力の効果.....	8
2.3.7 崩壊熱と UO_2 及び被ふく管の比熱の効果.....	9
2.3.8 ギャップの物性値と UO_2 及び被ふく管の線膨張係数の効果.....	9
2.3.9 破断口高さの効果.....	9
2.3.10 ECCSの効果.....	10
2.3.11 RELAP4EM(Mod 3)との比較.....	10
3. 解析結果の検討と結論.....	11
謝 辞.....	12
参考文献.....	12
Appendix A ROSAⅢ実験と比較のための解析.....	50
A.1 再循環系ポンプ吸込側破断.....	50
A.2 再循環系ポンプ吐出側破断.....	50
A.3 主蒸気管破断.....	50
APPENDIX B BWR/6(251-848)資料.....	88
APPENDIX C BWR/5のNRCサンプルインプット.....	111

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis of Break at Recirculation Pump Suction Line	1
2.1 Parameters of Analytical Conditions	1
2.2 Cases of Analyses	3
2.3 Analytical Results	5
2.3.1 Comparison of All Cases	5
2.3.2 Effects of Heat Slab	6
2.3.3 Effects of Discharge Coefficient C_D	6
2.3.4 Effects of Fluid Volume in Lower Plenum	7
2.3.5 Effects of Specific Heat of UO_2 and Cladding	7
2.3.6 Effects of Decay Heat	8
2.3.7 Effects of Decay Heat and Specific Heat of UO_2 and Cladding	9
2.3.8 Effects of Physical Properties of Gap and Linear Expansion Coefficients of UO_2 and Cladding	9
2.3.9 Effects of Break Height	9
2.3.10 Effects of ECCS	10
2.3.11 Comparison with RELAP4EM(Mod 3) and RELAP-4J	10
3. Discussions and Conclusions of Analytical Results	11
Acknowledgement	12
Reference	12
Appendix A. Analysis for Comparison of ROSAIII Experiments	50
A.1 Break at Recirculation Suction Line	50
A.2 Break at Recirculation Discharge Line	50
A.3 Steam Line Break	50
Appendix B Data of BWR/6 (251-848)	88
Appendix C NRC Sample input for BWR/5 Analysis	111

図 表 リ ス ト

Table 1 BWR/6 計算ケース (ポンプ吸込側ギロチン破断)

- Fig. 1 インプットに使用した崩壊熱
- Fig. 2 UO_2 と BN の熱伝導率
- Fig. 3 UO_2 と BN の体積比熱
- Fig. 4 ジルカロイとインコネル 600 の熱伝導率
- Fig. 5 ジルカロイとインコネル 600 の体積比熱
- Fig. 6 インプットに使用した UO_2 の線膨張係数
- Fig. 7 インプットに使用した被ふく管の線膨張係数
- Fig. 8 インプットに使用したギャップの熱伝導率
- Fig. 9 インプットに使用したギャップの体積比熱
- Fig. 10 BINGHAM ポンプのヘッド曲線
- Fig. 11 BINGHAM ポンプのトルク曲線
- Fig. 12 BWR/5 ポンプのヘッド曲線
- Fig. 13 BWR/5 ポンプのトルク曲線
- Fig. 14 BWR/6 用 HPCS, LPCS 注入流量と系圧力の関係
- Fig. 15 BWR/6 用 3LPCI 注入流量と系圧力の関係
- Fig. 16 BWR 解析用 ボリューム・ジャンクション構成
- Fig. 17 破断後の特性時刻の比較
- Fig. 18 炉心の完全露出 (ドライアウト) 時刻の比較
- Fig. 19 ケース B-①, ② の下部プレナム圧力
- Fig. 20 ケース B-①, ③ の PV 側流出流量
- Fig. 21 ケース B-① のポンプ側流出流量
- Fig. 22 ケース B-①, ③ の下部プレナム圧力
- Fig. 23 ケース B-①, ③ の下部ダウンコマ水位
- Fig. 24 ケース B-①, ③ の炉心入口流量
- Fig. 25 ケース B-①, ③ の燃料棒被ふく管表面温度
- Fig. 26 ケース B-⑩, ⑪ の PV 側流出流量
- Fig. 27 ケース B-⑩ のポンプ側流出流量
- Fig. 28 ケース B-⑩, ⑪ の下部プレナム圧力
- Fig. 29 ケース B-⑩, ⑪ の下部ダウンコマ水位
- Fig. 30 ケース B-③, ④ の下部プレナム圧力
- Fig. 31 ケース B-③, ④ の下部ダウンコマ水位
- Fig. 32 ケース B-③, ④ の PV 側流出流量

- Fig. 33 ケースB-③, ④のポンプ側流出流量
- Fig. 34 ケースB-③, ⑥の炉心各ボリュームにおける UO_2 平均温度
- Fig. 35 ケースB-③, ⑥の炉心各ボリュームにおける燃料棒中心温度
- Fig. 36 ケースB-③, ⑥のVol. ⑫における半径方向の燃料棒温度分布
- Fig. 37 ケースB-③, ⑥の炉心各ボリュームにおける燃料棒表面熱流束
- Fig. 38 ケースB-③, ⑥の下部プレナム圧力
- Fig. 39 ケースB-③, ⑥のPV側流出流量
- Fig. 40 ケースB-③, ⑥の炉心入口流量
- Fig. 41 ケースB-⑤, ⑥の炉心各ボリュームにおける UO_2 平均温度
- Fig. 42 ケースB-⑤, ⑥における下部プレナム圧力
- Fig. 43 ケースB-⑤, ⑥における炉心入口流量
- Fig. 44 ケースB-⑦, ⑧における下部プレナム圧力
- Fig. 45 ケースB-⑦, ⑧のVol. ⑫における半径方向の燃料棒温度分布
- Fig. 46 ケースB-③, ⑤の下部プレナム圧力
- Fig. 47 ケースB-⑤, ⑧のVol. ⑫における半径方向の燃料棒温度分布
- Fig. 48 ケースB-⑤, ⑧の下部プレナム圧力
- Fig. 49 ケースB-⑤, ⑧のPV側流出流量
- Fig. 50 ケースB-⑤, ⑧の炉心入口流量
- Fig. 51 ケースB-⑪, ⑫の下部プレナム圧力
- Fig. 52 ケースB-⑪, ⑫のPV側流出流量
- Fig. 53 ケースB-⑪, ⑫のPV側破断配管圧力
- Fig. 54 ケースB-⑪, ⑫のポンプ側流出流量
- Fig. 55 ケースB-⑪, ⑫の下部プレナム水位
- Fig. 56 ケースB-⑥, ⑨の炉心内クオリティの分布
- Fig. 57 ケースB-⑥, ⑨の下部プレナム圧力
- Fig. 58 ケースB-⑥, ⑨の下部プレナムクオリティ
- Fig. 59 ケースB-⑨のECCS水注入流量
- Fig. 60 ケースB-⑥, ⑨の炉心上・下部における燃料棒被ふく管表面温度
- Fig. 61 ケースB-⑪, ⑬の炉心上・下部におけるクオリティ
- Fig. 62 ケースB-⑪, ⑬の炉心上・下部における燃料棒被ふく替表面温度
- Fig. 63 ケースB-⑪, ⑭のVol. ⑫における半径方向の燃料棒温度分布
- Fig. 64 ケースB-⑪, ⑭の下部プレナム圧力

1. はじめに

一般に公開されている実炉のLOCA解析結果は、安全評価指針に即した、いわゆる安全評価コードで計算されたものである。しかしながら安全評価コードは、実際に生じる現象の予測が困難な現象に対しては安全側と考えられる仮定を採用しているので、ROSA-III試験のように個々に生じる具体的現象の解析を行なうには必ずしも適切でない仮定を有している。したがって、ROSA-III試験を行うにあたり、これを事前に解析するコードは実験データとの比較およびコードの改良のために、最適評価指向のコードが適切である。ROSA-IIIのモデルである実炉(BWR/6, 251/848)に対しても、現在使用可能な最適評価指向のコードを使用して解析することは、ROSA-III試験との対応上必要である。

本報は前報^{(1),(2)}のBWR/LOCA解析の不十分さを補ってこれからのROSA-III計画に反映させるために、あらかじめLOCA過程に及ぼす解析上のパラメータの効果を調べ、大きな影響を及ぼす因子や、炉心が熱的に厳しくなるような因子の効き方について調べたものである。特に、再循環ポンプ吸込側におけるギロチン破断の場合について、前報^{(1),(2)}のBWR/6のインプット値を再度検討した。検討の対象としたのは、崩壊熱、 UO_2 と被ふく管の物性値、燃料棒ギャップの物性値、再循環ポンプの特性曲線、二相流放出係数 C_D 、ヒートスラブ、下部プレナムの流体容積、破断口高さである。ECCSの効果についても検討した。さらに、最適評価指向のコードと安全評価コードとの違いが解析結果に及ぼす影響についても検討した。

なお、再循環ポンプ吸込側破断の場合で破断口面積を変えた計算結果、および他の破断条件である再循環ポンプ吐出側破断と主蒸気管破断についての計算結果についてはAppendix Aに示した。参考にした資料は、GESSAR⁽³⁾(主要な設計条件についてはAppendix Bに示した)、NEDO 10329⁽⁴⁾、およびBWR/5に対する米国NRCのサンプルインプット(Appendix C)である。使用したコードは、最適評価指向のコードとして前報^{(1),(2)}で用いたコードの改良版であるRELAP-4J⁽⁵⁾と、安全評価コードであるRELAP-4EM(MOD3)⁽⁶⁾である。

2. 再循環ポンプ吸込み側破断

2.1 計算パラメータ

再循環ポンプ吸込み側破断を基準として以下に示すBWR/6のインプット値を検討する。

(1) 崩壊熱

前報^{(1),(2)}で使用した崩壊熱は、制御棒が破断後0.9秒から挿入が始まることに基づいている。本報告では、上記の発熱曲線のほかに、GE+3 σ *の曲線及びROSA-III実験に使用する

*日本の安全審査において採用されている崩壊熱曲線

1. はじめに

一般に公開されている実炉のLOCA解析結果は、安全評価指針に即した、いわゆる安全評価コードで計算されたものである。しかしながら安全評価コードは、実際に生じる現象の予測が困難な現象に対しては安全側と考えられる仮定を採用しているので、ROSA-III試験のように個々に生じる具体的現象の解析を行なうには必ずしも適切でない仮定を有している。したがって、ROSA-III試験を行うにあたり、これを事前に解析するコードは実験データとの比較およびコードの改良のために、最適評価指向のコードが適切である。ROSA-IIIのモデルである実炉(BWR/6, 251/848)に対しても、現在使用可能な最適評価指向のコードを使用して解析することは、ROSA-III試験との対応上必要である。

本報は前報^{(1),(2)}のBWR/LOCA解析の不十分さを補ってこれからのROSA-III計画に反映させるために、あらかじめLOCA過程に及ぼす解析上のパラメータの効果を調べ、大きな影響を及ぼす因子や、炉心が熱的に厳しくなるような因子の効き方について調べたものである。特に、再循環ポンプ吸込側におけるギロチン破断の場合について、前報^{(1),(2)}のBWR/6のインプット値を再度検討した。検討の対象としたのは、崩壊熱、 UO_2 と被ふく管の物性値、燃料棒ギャップの物性値、再循環ポンプの特性曲線、二相流放出係数 C_D 、ヒートスラブ、下部プレナムの流体容積、破断口高さである。ECCSの効果についても検討した。さらに、最適評価指向のコードと安全評価コードとの違いが解析結果に及ぼす影響についても検討した。

なお、再循環ポンプ吸込側破断の場合で破断口面積を変えた計算結果、および他の破断条件である再循環ポンプ吐出側破断と主蒸気管破断についての計算結果についてはAppendix Aに示した。参考にした資料は、GESSAR⁽³⁾(主要な設計条件についてはAppendix Bに示した)、NEDO 10329⁽⁴⁾、およびBWR/5に対する米国NRCのサンプルインプット(Appendix C)である。使用したコードは、最適評価指向のコードとして前報^{(1),(2)}で用いたコードの改良版であるRELAP-4J⁽⁵⁾と、安全評価コードであるRELAP-4EM(MOD3)⁽⁶⁾である。

2. 再循環ポンプ吸込み側破断

2.1 計算パラメータ

再循環ポンプ吸込み側破断を基準として以下に示すBWR/6のインプット値を検討する。

(1) 崩壊熱

前報^{(1),(2)}で使用した崩壊熱は、制御棒が破断後0.9秒から挿入が始まることに基づいている。本報告では、上記の発熱曲線のほかに、GE+3 σ^* の曲線及びROSA-III実験に使用する

*日本の安全審査において採用されている崩壊熱曲線

予定の崩壊熱曲線を用いる。これらの曲線をFig. 1 に示す。

(2) UO_2 と被ふく管の物性値

UO_2 と被ふく管の熱伝導率と比熱について、前報で使用した値⁽¹⁾、NEDO 10329⁽⁴⁾の値、およびNRCサンプルインプット値 (APPENDIX C参照)の3ケースをFig. 2~Fig. 5 に示す。

UO_2 と被ふく管の線膨張係数 (Fig. 6, Fig. 7) については前報で使用した値⁽¹⁾、GESSAR⁽³⁾の値、NRCサンプルインプット値の3ケースを比較する。なお本解析における UO_2 の温度範囲は、結果的に150~650 °C (300~1200 °F)程度であり、被ふく管の温度は、150 °C (300 °F)程度であった。

(3) ギャップの物性値

ギャップの熱伝導率と体積比熱 (Fig. 8, Fig. 9) については、前報で使用した値⁽¹⁾、参考文献⁽⁶⁾より推定した値、NRCのサンプルインプット値の3ケースを比較した。

ギャップの物性値は、F.P. ガスの組成など複雑であるので、体積比熱に関する推定値には大きな幅がある。

(4) ポンプ特性曲線

前報で使用したポンプ特性曲線は、RELAP 4 (Mod 2) に組み込まれているBingham Pump Companyのポンプ特性曲線 (单相領域のもの) である。この特性曲線をFig. 10, Fig. 11 に示す。

今回の解析に使用したポンプ特性曲線は、NRCのサンプルインプットで使用されているBWR/5のポンプ特性曲線である。Fig. 12, Fig. 13 に特性曲線を示す。パラメータサーベイをしないで、このポンプ特性曲線を使用した理由は、RELAP-4Jコードに組み込まれているポンプは、もともとPWRに使用されたものであり、BWR/5の解析に使用されたポンプ特性曲線を使用する方が、BWR/6のポンプ特性に近いであろうと考察したからである。

(5) 二相流放出係数 C_D の値

Moody の二相臨界流に対する放出係数 C_D をROSA-I実験から得た次の相関式⁽⁹⁾を使用した場合と、 $C_D=1.0$ と固定した場合の2ケースについて比較を行った。

$$C_D = 0.57 + \frac{0.002}{X}$$

X は、ジャンクションにおける流体のクオリティーである。流出流量は、この C_D を用いて計算した流量と慣性流量とを比較して小さい方を採用するようにプログラム上では設定されている。

流出流量については、相関式を用いる方がより現実的である。 $C_D=1.0$ とすると、流出流量を多めに見積る。

(6) ヒートスラブ

BWR/6のヒートスラブを見積ることは、資料不足のため困難である。それゆえヒートスラブの効果を定性的に見積るため、NRCのサンプルインプットの値をそのままBWR/6に付けた場合と、炉心以外にはヒートスラブをつけない場合とを比較検討する。

(7) 下部プレナムの流体容積

CESSAR⁽³⁾に記載されている各ボリュームにおける流体容積等は、ボリューム分割が大まかすぎるために、より詳細にボリューム分割する場合のインプット作成に問題を生じる。特に流体容積の設定が不明確である下部プレナム、バイパス部について、流体容積を変えてみてその影響を検討する。今までの解析ではガイドチューブ（炉心を支持し、制御棒を収納する管）内の流体容積を下部プレナムに含めていたが、ガイドチューブと下部プレナムの間の流動抵抗が比較的大きいので、ガイドチューブと下部プレナムを区別し、ガイドチューブ容積をバイパス部に含めた影響をみる。

(8) 破断口高さの効果

再循環系配管圧力容器側ノズルの高さ、ROSA-III実験装置破断ユニット相当のレベルでの破断高さの違いによる効果をみる。つまり、ROSA-III実験では破断口高さは固定された破断ユニットにより決まっているが、この高さは必ずしも実炉条件としては一般的なものではないので、破断口高さを1つのパラメータとしたものである。

(9) ECCSの効果

使用したECCS流量をFig. 14, Fig. 15に示す。この値はCESSAR⁽³⁾より見積った値である。

HPCSの注入開始は、破断発生後27秒とする。LPCS及びLPCIは、PV圧力がFig. 14, Fig. 15に示す規定圧力になると注入される。注入箇所は、HPCS及びLPCSが上部プレナム（Volume①）、LPCIがバイパス領域（Volume⑩）である。（Fig. 16参照）

(10) コードの違いが計算結果に及ぼす影響

RELAP4J⁽⁵⁾は、RELAP4(Mod 2)に対して、Moodyの二相臨界流に対する放出係数 C_D にROSA-Iから得られた実験式を入れ、気液分離モデルの気泡離脱速度 V_B にWilsonの式を入れるなどして、実際の現象をより正確に計算できるように一部のモデルを改良したものである。RELAP4Jと、RELAP4EM(Mod 3)の最適評価オプション（2-3-11参照）との解析結果の比較を行ない、コードによる解析結果の違いを調べた。両者の大きな差は、ギャップコンダクタンスをコードの中で計算するか、しないかにある。RELAP4-EMコードの中でギャップコンダクタンスを計算する。その他、インプットの一部が異なる。（文献6参照）

2.2 計算ケース

計算ケースをTable 1に示す。本解析に使用したボリューム、ジャンクションをFig. 16に示す。炉心はボリューム⑰～⑳である。破断形式は全てギロチン破断を仮定する。以下に各ケースの特徴を示す。

ケースB-①

このケースは、前報⁽²⁾のインプットと比較すると次の3点のみが異なる。ポンプ特性曲線をFig. 11に示すBingham Pump Companyのポンプ特性に代って、NRCサンプルインプット（APPENDIX C参照）のポンプ特性Fig. 12, Fig. 13を使用した。炉心を3ボリューム

ームに区切っていたのを炉心各部の状態をより詳細に把握するために8ボリュームとした。炉心入口流路面積を、実炉に即した値に訂正した。

ケース B-②

このケースは、炉心以外のヒートスラブの効果を定性的に把握するために行ったものである。

B-①とは、ヒートスラブに関してのみ異なる。B-①のヒートスラブは炉心以外にはつけていないが、B-②では、2-1の(6)で述べたように、NRCサンプルインプット値を、そのまま使用する。

ケース B-③

二相流放出係数の効果をみるために行ったケースである。

B-①とは C_D の取り扱いのみ異なる。B-①は、二相流放出係数 C_D に対して、2-1の(5)で述べたようにROSA-I実験で得た相関式を使用するが、B-③は、 $C_D=1.0$ と固定して計算する。

ケース B-④

流体容積に対する不確定さの効果をみるために行ったケースである。

B-③と比較することによりその効果をみる事が出来る。変化させた流体容積は、次の3ボリュームである。下部プレナム (Volume ⑮) を仮に 56.64m^3 (2000ft^3)減じる。バイパス領域 (Volume ⑯) を仮に 28.32m^3 (1000ft^3)増加し、ボリューム下端高さを0mにし、ボリューム高さを下部プレナムのボリューム高さだけ増加させる。上部ダウンカム (Volume ③) を仮に 28.32m^3 (1000ft^3)増加する。上部ダウンカムの体積の増加は、全体積をB-③と同じにするためである。

ケース B-⑤

このケースは、B-③と比較して、崩壊熱及び UO_2 と被ふく管の熱伝導率と比熱が異なる。これらのパラメータが、どの程度解析結果に影響を与えるかを、調べるために行ったものである。

ケース B-⑥

このケースをB-⑤と比較することにより、前報⁽¹⁾で用いた崩壊熱とROSA-III実験の初期に使用される予定の崩壊熱との違いが解析結果に与える影響を調べることが出来る。

ケース B-⑦

このケースは、B-⑥と比較するとギャップの取り扱いが異なる。ギャップの熱容量と比熱、及びギャップの間隔を決める UO_2 と被ふく管の線膨張係数を、NRCのサンプルインプットと同じ値にした。

ケース B-⑧

このケースは、B-⑦と比較すると、崩壊熱が異なる。崩壊熱をROSA-III実験の初期に使用される予定の値とする。これは、B-⑥⑦の比較に対し、ギャップの取り扱いを、B-⑦と同じにした場合の崩壊熱の効果を考察するために行ったものである。

ケース B-⑨

B-⑥に対し、ECCSを作動させた場合の効果をみるために行ったものである。

ケース B-⑩

このケースでは、ギャップの物性値以外は、参考文献^{(3),(4)}に基づいた値を使用する。ただし

二相流放出係数 C_D の値は、2-1の(5)で述べた ROSA-I の実験データによる式を使用する。

ケース B-⑩

このケースは、B-⑩と比較すると二相流放出係数 C_D の値のみ異なる。これはB-⑩と比べて C_D の値がどの程度影響があるかを検討したものである。

ケース B-⑫

このケースは、B-⑩と比較すると、破断口の高さが3.85m低くなっている。この値は、ROSA-Ⅲの破断装置の高さに対応する。これは破断口位置の効果を考察するために行ったものである。

ケース B-⑬

ケースB-⑩に対し、ECCSを作動させた場合の効果をみるために行ったものである。

2.3 解析結果

解析ケースの入力値の違いはTable 1 に示してある。

2.3.1 全ケースの比較

本解析の全体の傾向をみるために、全ケースについて以下の特性時刻の比較をする。

- (a) 下部ダウンコマ水位 (Volume ⑤) が下り始める時刻 t_1
- (b) 下部ダウンコマ水位がジェットポンプサククションノズルに達する時刻 t_2
- (c) 下部ダウンコマ水位が、再循環ポンプサククションラインの圧力容器ノズルに達する時刻 t_3
- (d) 下部プレナム (Volume ⑬) フラッシング開始時刻 t_4
- (e) 炉心内クオリティーが1.0になる時刻

(a)は、破断後数秒における流出流量の目やすとなる。(b)は、ジェットポンプ側破断口 (Junction 33)からの流出流量がクオリティー上昇のため減少する時刻に対応するものである。(c)は、圧力容器側破断口 (Junction 32)からの流出流量がクオリティー上昇のため減少する時刻に対応する。この時点から蒸気放出となるため、圧力容器内圧力が急速に低下し始める時刻にも対応する。(d)は、炉心流量がほとんどなくなった状態 (ウィンドウと呼ばれる状態)以降で、下部プレナム圧力が飽和圧力まで下ったためにフラッシングすることにより炉心流量が回復する時刻に対応する。この時刻は、炉心を冷却するという立場から重要な特性値である。(e)は、炉心内に水がなくなり炉心が完全に露出した時刻に相当する。Fig.17, Fig.18にこれらの時刻を示す。

t_1 は、ケースB-④以外は3秒である。ケースB-④の値が異なるのは、流出流量が異なるからではなく上部ダウンコマの体積を他のケースと比較して約40%だけ増加させたためである。

t_2 は、全ケースほとんど8秒程度の値を示す。

t_3 は、14.5秒~18秒の値を示す。ケースB-①~⑥及びB-⑨⑩は15秒程度の値を示し、ケースB-⑦⑧⑪⑬が16.5秒程度、ケースB-⑫が18秒程度の値を示す。これらのグ

ループの特徴を Table 1 を参考に見出すと、以下の様になる。 C_D の値が 1.0 でないケース B-①②, B-⑨及び破断口高さが異なるケース B-⑫を除いて考察すると、ギャップの取り扱いの違いが影響していることがわかる。ケース B-③~⑥及び⑨は、ギャップの熱伝導率と比熱及び UO_2 と被ふく管の線膨張係数に前報で使用した値を用いた場合であり、ケース B-⑦⑧⑩⑬は、それらの物性値に NRC サンプルインプット値又は GESSAR⁽³⁾ 及び参考文献⁽⁸⁾ から推定した値を使用した場合である。

t_4 は 1.2 秒~17.5 秒の範囲の値を示すが、ケース B-⑦⑧⑩⑪⑫⑬とそれ以外のグループに分けることが出来る。このグループ分けは、 t_3 の場合と同様にギャップの取り扱いが異なることによる。このグループ分けは、ケース B-⑤以外は、 t_3 と t_4 の時刻の順序のグループ分けと同じになる。

炉心内クオリティーが 1.0 になる時刻は、Fig. 18 に示すように、95~120 秒程度である。>>> の印は、左側から順に、炉心上部から下部へと各ボリュームのクオリティーが 1.0 になる時刻を示す。

2.3.2 ヒートスラブの効果

ケース B-①, B-②を比較する。B-②には仮に $BWR/5$ のヒートスラブが付けてある。ヒートスラブの影響が最も明瞭に出て来るのは圧力容器圧力である。この圧力の代表として下部プレナム圧力を取り、両ケースを比較する。Fig. 19 に示す様に、ヒートスラブを付けた方が約 30 秒から 1 ata 程度高い値を示すが 65 秒から逆転し 90 秒以後は同じ値を示す。この計算に使用したヒートスラブは 2-1 の(6)で述べたように $BWR/6$ の値ではないが、大差はないはずである。一般的には、ヒートスラブを付けた方が、ブローダウン後半において圧力容器圧力は高くなると考えられるが、本解析では、一時逆転して 90 秒以降は両者とも同じ値を示している。

この解析例では、ブローダウン初期~25 秒までは、ヒートスラブの効果は現われないことが結論出来る。それ以降もヒートスラブをつけたことによる圧力容器圧力の上昇はせいぜい 1~2 ata 程度である。

2.3.3 二相流放出係数 C_D の効果

ケース B-①, B-③の比較をする。 $C_D = 1.0$ とした場合 (B-③) と、2-1 の(5)で述べた $C_D = 0.57 + \frac{0.002}{X}$ を使用した場合 (B-①) の比較である。

圧力容器破断口流出流量は Fig. 20 に示す様に、ブローダウン初期は、 $C_D = 1.0$ とした場合の方が大きく、後半 50 秒以降は逆に、 100 kg/sec 程度 $C_D = 1.0$ とした場合の方が小さくなっている。

ポンプ側破断口流出流量は、両者ともほとんど差はない。ケース B-①の値を Fig. 21 に示す。

C_D による流出流量の違いが、圧力容器圧力変化に影響する。この効果を Fig. 22 に示す。流出流量の違いは、約 10 秒から効き始めている。 $C_D = 1.0$ の方が、ブローダウン初期の流出流量が大きいから圧力の降下が早い。ブローダウン後半の流出流量の違いは、圧力を逆転する

ほどに至っていない。傾向としては、ブローダウンの中後期の圧力容器圧力は、 $C_D=1.0$ とした方が1~5 ata 低い値を示すことになる。

下部ダウンコマ水位は、Fig. 23 に示すように $C_D=1.0$ の方が約10秒以降、早く降下する。これは、流出流量の違いのためである。

Fig. 17 の各特性時刻を比較すると、放出流量及び圧力容器圧力の違いが表われている。 t_3 は、下部ダウンコマ水位に依存して、 $C_D=1.0$ の方が約0.5秒早くなる。 t_4 は、下部プレナム圧力変化に依存して $C_D=1.0$ の方が約1秒早くなる。

炉心入口流量 (Fig. 24) を比較すると、流量は振動しているが、差はほとんどなく、下部プレナムフラッシングの時刻は $C_D=1.0$ の方が約1秒早くなっているため、その時刻のずれ程度の差が生じている。

燃料棒表面温度 (Fig. 25) は、炉心流量が両者とも同じ程度であるので、違いはほとんどない。

ケースB-⑩, ⑪の比較をする。比較結果をFig. 26~Fig. 29 に示す。この結果は時刻のずれはあるがふるまいは、ケースB-①, ③の比較とほとんど同じである。ただし、 t_3 の時刻は、ケースB-⑩の方が遅くなっている。

2.3.4 下部プレナムの流体容積の効果

ケースB-③④を比較する。解析条件の違いは、ケースB-④の説明に示されている。

下部プレナム圧力の比較をFig. 30に示す。ケースB-④の方が10~25秒までは約1 ata高いが、約30秒以降は最大約5 ata低い値を示す。この相違は、系内の初期エネルギー及び質量の違いが、流出流量に変化を及ぼした結果であると考えられる。

下部ダウンコマ水位 (Fig. 31) を比較する。ケースB-④では、上部ダウンコマの体積を約40%増加させたため下部ダウンコマの水位が下降し始める時刻が約1秒遅れた。

破断口流出流量をFig. 32~33に示す。ダウンコマ水位及び圧力容器圧力の影響が現われている。

2.3.5 UO_2 と被ふく管の比熱の効果

ケースB-③, ⑥を比較する。 UO_2 の比較についてはFig. 3に示すように、前報⁽¹⁾と同じ値を用いたケースB-③の方がNRCサンプルインプット値を使用したケースB-⑥の値よりかなり大きい。被ふく管の比熱についても、ケースB-③の方が400°C付近では約1.5倍B-⑥より大きい値を示す。(Fig. 5 参照) これらの差が、破断後の UO_2 の温度挙動に及ぼす効果を以下に示す。代表時刻として0秒と11秒の値をとり、その時刻の値を比較する。

Fig. 34 に各炉心ボリュームにおける UO_2 の平均温度を示す。Fig. 35に UO_2 ペレット中心温度を示す。Fig. 36 にボリューム5における温度分布を示す。この図は比較のために描いたものであり、実際の温度分布は、上に凸のなめらかな曲線になる。この図は、 UO_2 中心温度、ギャップ温度、被ふく管表面温度を使用して描いた。これらの図より、破断以前は UO_2 の温度はケースB-⑥の方が少し小さく計算されていることがわかる。しかし破断後は、比熱が約2倍大きいケースB-③の方が、 UO_2 の温度が冷えていく。その差は30~160°Cである。

被ふく管の温度は、破断後 11 秒でも両者ともほとんど同じで、比熱の差は解析には大きな差として現われない。

Fig. 37 に、燃料棒表面熱流束を示す。t = 0 秒では両者ともまったく同一であるが、t = 11 秒では炉心上部を除いてケース B-③の方が大きくなっている。炉心内流体温度は、破断以前は約 289°C で破断後 11 秒ではケース B-③が 291°C、ケース B-⑥は 287°C であり、ケース B-③の方が 4°C ほど高い値を示している。

燃料棒被ふく管表面温度は、両者ともほとんど同じである。炉心内クオリティーは、ケース B-③の方が少し早く上昇する。

Fig. 38 に下部プレナム圧力変化を示す。ケース B-③の方がいつも高めに出ている。これは炉心の蓄積熱の差のためである。

Fig. 39 に、圧力容器側破断口流出流量の比較を示す。両ケースの圧力容器圧力の差が、両ケースの流出流量の差に現われている。

Fig. 40 に炉心入口流量の比較を示す。下部プレナムフラッシング時刻については、ケース B-⑥の方が早い以外、特に大きな違いはみられない。

2.3.6 崩壊熱の効果

ケース B-⑤⑥を比較する。ケース B-⑤の崩壊熱は ROSA-III 実験初期に使用される予定の値を使用している。ケース B-⑥の値は前報^{(1),(2)}で使用した値である。

各々の崩壊熱を Fig. 1 に示す。ケース B-⑥では 0.9 秒まで初期出力は一定である。3 秒までは、ケース B-⑥の方が出力が大きい。3~8 秒まではほとんど値は同じである。8 秒以降は、ケース B-⑥の方が出力が大きい。全体的には、ケース B-⑥の出力は大きめに見積られていることになる。この効果は、 UO_2 の平均温度に現われている。Fig. 41 に各ボリュームでの UO_2 の平均温度を示す。t = 0 秒では、両ケースの温度は一致している。t = 1 秒では、ケース B-⑤の方の温度は少し下がるがケース B-⑥の方はほとんど下らず t = 0 秒の値とほぼ同じ値である。その後の時刻でもケース B-⑥の方が、温度が高いことがわかる。下部プレナム圧力の比較を Fig. 42 に示す。5~15 秒の間にはケース B-⑥の方の圧力が少し高いが、その他は両ケースともほぼ一致している。破断口流出流量については、圧力容器圧力が両ケースでほぼ同じ値であるので両ケースの値はほぼ同じになっている。炉心入口流量の比較を Fig. 43 に示す。この値も両ケースでほぼ同じである。

燃料棒被ふく管表面温度は、両ケースともほとんど同じである。次に、ケース B-⑦、⑧を比較する。ケース B-⑤、⑥との相違点は、ギャップの物性値及び UO_2 と被ふく管の線膨張係数が異なる。Fig. 44 に下部プレナム圧力の比較を示す。両ケースの圧力の差の傾向は、ケース B-⑤、⑥圧力の差の傾向とほとんど同じである。Fig. 45 に燃料棒半径方向温度変化を示す。ケース B-⑦の方が t = 11 秒では少し高めに出ている。これは崩壊熱の違いによるものである。

燃料棒被ふく管表面温度は、両ケースともほとんど同じ値を示す。

以上の結果より、これらの崩壊熱の違いはブローダウン初期 (~10 秒) のふるまいに影響をしているが、約 20 秒以後は圧力容器圧力にほとんど影響はない。燃料棒被ふく管表面温度

もブローダウン後50秒でケースB-⑤, ⑥の場合10°C程度しか違わない。

2.3.7 崩壊熱及び UO_2 と被ふく管の比熱の効果

ケースB-③, ⑤を比較する。ケースB-③は前報^{(1),(2)}の値を使用しているが、B-⑤は、崩壊熱はROSA-III実験初期に使用される値、 UO_2 と被ふく管の比熱はNRCサンプルインプット値を使用している。

Fig. 1より、崩壊熱はほとんどの領域でケースB-③の方がケースB-⑤より高い。 UO_2 の比熱は、Fig. 3よりケースB-③の方が約2倍の値である。被ふく管の比熱もB-③の方が約1.5倍(400°Cにおいて)の値である。

これらの値の相違は、一般にケースB-③における一次系内の圧力を高く見積る方向にある。Fig. 46に下部プレナム圧力の比較を示す。2.3.5, 2.3.6の結果より、それらの相乗効果はPV内圧力変化に対しては、単なる和として効いていることがわかる。

2.3.8 ギャップの物性値及び UO_2 と被ふく管の線膨張係数の効果

ケースB-⑤, ⑧を比較する。 UO_2 の線膨張係数は、ケースB-⑧に比較してケースB-⑤の方は約10%(約800°Cにおいて)程度大きい(Fig. 6)。被ふく管のそれは約5%ほどケースB-⑤の方が小さい(Fig. 7)。ギャップの熱伝導率は、ケースB-⑧に比べてケースB-⑤の方は約 $1/3$ の値である(Fig. 8)。ギャップの体積比熱は、ケースB-⑤の方が約100倍大きい(Fig. 9)。

Fig. 47に炉心中央(Volume ②)における燃料棒半径方向温度変化を示す。 $t=0$ 秒では、 UO_2 温度はケースB-⑤の方が約200°C高く、 $t=50$ 秒においても約100°C高い値を示す。ギャップの中は両者とも同程度であり、ギャップの体積比熱は差はあるがその絶対値は非常に小さいから問題にはならない。それゆえ、この燃料温度の違いは大部分ギャップの熱伝導率の差にあると考えられる。

Fig. 48に両ケースの下部プレナム圧力の比較を示す。ケースB-⑤では UO_2 の温度が高いため、その分だけ約45秒まで高い圧力を示す。

Fig. 49に、圧力容器側破断口流出流量を示す。Fig. 48に示す圧力の違いが、流出流量の違いに効いている。

Fig. 50に、炉心入口流量を示す。下部プレナムフラッシング時刻は、Table 1よりケースB-⑤は約15秒、ケースB-⑧は約12.5秒である。

以上の結果より、ギャップの熱伝導率の違いは、燃料棒内の温度分布に大きな効果があることがわかる。さらに下部プレナムフラッシング時刻にも大きな寄与をしている。

ケースB-⑥, ⑦の比較は省略するが、上記ケースB-⑤, B-⑧の差と同じ傾向である。これは、Fig. 1の崩壊熱の違いは、ギャップの熱伝導率の違いよりも小さい効果しか及ぼさないためである。

2.3.9 破断口高さの効果

ケースB-⑪, ⑫を比較する。ケースB-⑫の方が、3.66m破断口高さが下っている。

Fig. 51 に、下部プレナム圧力の比較を示す。ケースB-⑪の方が低いのは、流出流量が多いためである。

この結果より、破断口レベルを下げると、流出流量は全体としては少く見積ることになる。又、圧力容器圧力は高く見積ることになる。

Fig. 52 に、圧力容器側破断口流出流量の比較を示す。ケースB-⑫の方がブローダウン初期に流出流量が少いのは、配管内流体容積の効果であると考えられる。Fig. 53 に圧力容器側破断配管圧力の比較を示す。ブローダウン初期はケースB-⑫の方が圧力は少し低いが、後半は逆に圧力が高い。

Fig. 54 に、ポンプ側破断口流出流量を示す。これは両者ともほとんど同じである。

Fig. 55 に、下部ダウンコマ水位の比較を示す。

2.3.10 ECCSの効果

ケースB-⑥、⑨を比較する。ケースB-⑥はECCSを作動させなかったケースであり、ケースB-⑨はECCSを作動させたケースである。

Fig. 56 に、炉心上部と下部のクオリティーの比較を示す。ECCS水を注入した方が、炉心内クオリティーが高くなっている。これはECCS水により上部プレナムの圧力が下り、減圧沸騰が盛んになったためであると考えられる。約65秒で、ケースB-⑨のクオリティーが下るのは、下部プレナムからの水の流入による。

Fig. 57, Fig. 58 に下部プレナム圧力とクオリティーを示す。65秒で、ケースB-⑨の下部プレナムのクオリティーが下るのは、バイパスを通過してECCS水が流入したためである。

Fig. 59 にECCS注入流量を示す。

Fig. 60 に燃料棒被ふく管表面温度を示す。

ケースB-⑪、⑬を比較する。ケースB-⑪はECCSを作動させなかったケースであり、ケースB-⑬はECCSを作動させたケースである。Fig. 61, Fig. 62 に炉心内クオリティーと燃料棒被ふく管表面温度の比較を示す。この結果はB-⑥、⑧の場合と同じである。

これらの結果より、ECCS水は炉心内には直接流入しないで、バイパスを通過して下部プレナムから炉心に入ることがわかった。80秒以後に、ECCS水を注入したケースではコード上の計算不安定のため計算が止った。

2.3.11 RELAP4EM(Mod 3)⁽⁶⁾ との比較

ケースB-⑪、⑭を比較する。コードの比較として使用したのはEMコード⁽⁶⁾であるが、以下に示すように、それにはオプションとして2種類あり、この計算で使用したオプションは、米国NRCの安全評価指針に合ったもの(EMオプション)ではなく最適評価用のオプションである。これはMod 3 のオプションのうち、最適評価に近いものを選んだ方が、ROSA-III実験の参考という意味からも有効であると思われるからである。

RELAP4EM コードにおいて採用したオプションは以下の通りである。Program Option Flagは、0(RELAP4 with minimum controls), Program Typeは、1(Non-

standard RELAP4EM Type of Program. This Option does not meet the NRC Evaluation Model Acceptance Criteria), Heat Transfer Logic は, 1 (use EM Heat Transfer Logic), Pin Swelling and Flow Blockage Flag は, 1 (Include EM Pin Swelling and Flow Blockage) である。

ボリューム⑩における燃料棒半径方向の温度変化の比較を Fig. 63 に示す。ブローダウン初期には, UO_2 ベレットの温度は $200^\circ C$ ほどケース B-⑭の方が高い値を示す。これは, コードのギャップコンダクタンスの取扱いの違いによるものと思われる。この差が, 圧力容器内圧力変化に影響を及ぼし, Fig. 64 に示すようにケース B-⑭の方がいつも高い圧力を示す。Fig. 17 に示す特性時刻を比較すると, 下部プレナムフラッシング時刻はケース B-⑩と比較すると 3 秒おくれる。炉心内がドライアウトになる時刻は 2 秒早くなる。

3. 解析結果の検討と結論

以上, RELAP-4J コードを用いて行った実炉 (BWR/6) の再循環ポンプ吸込側におけるギロチン破断の解析で炉心の冷却条件等に影響を及ぼすパラメータについて検討した結果, 次の結論が得られた。

本解析で使用したパラメータの中で燃料棒被ふく管表面温度に一番大きな影響を与えるのは, ギャップの物性値である。その他のパラメータは解析した範囲内ではほとんど影響を与えていない。ギャップの物性値は, 反応度事故模擬実験のように非常に早い変化に対しては詳細な研究が行われているが, LOCA のように比較的ゆっくりした変化に対する実験的研究はなされていないのが現状である。またこの物性値は, ダウンコマ水位下降速度, 下部プレナムフラッシング時刻にも大きな影響を与えている。従ってこの物性値を正しく推定する必要がある。ROSA-III 試験ではその影響を出力模擬上考慮することが必要である。

ヒートスラブの効果は, 大破断時のブローダウン過程においては比較的少ないから重要な因子ではない。二相流放出係数 C_D の効果は破断口流出流量に現われ, 従って系圧力と下部プレナムフラッシング等の特性時刻とに影響を及ぼす。流体容積のとり方の違いは, 原子炉内水位が破断口高さまで低下する時間に影響し, 従って系圧力にも影響を及ぼす。 UO_2 の物性値の違いは LOCA 過程全般に影響を及ぼすが, この程度の違いでは特性時刻に対しては大きな影響を与えない。また, Fig. 1 に示す程度の崩壊熱の相違は, 破断初期を除いて解析結果にはほとんど影響を与えない。破断口高さを下げることにより破断口までの配管長さが変わることで, この影響としては流出流量を少く見積ることになった。ECCS 水は炉心内に上部から直接流入せず, バイパス部を通過して下部プレナムから炉心に流入したことがわかった。RELAP4EM (MOD3) の最適評価オプションとの比較計算では, コード内でのギャップコンダクタンスの取扱い方が違うため, 解析結果に多少の差が生じた。

次に, これらの解析をふまえて, ROSA-III 試験に関して次のことが提言できる。ROSA-III の模擬燃料棒 (電気ヒーター) には, 本解析で問題になったギャップは存在しないが, 実験では流体への伝熱量を模擬燃料棒の電気出力を制御して行うことが計画されている。したがっ

standard RELAP4EM Type of Program. This Option does not meet the NRC Evaluation Model Acceptance Criteria), Heat Transfer Logic は, 1 (use EM Heat Transfer Logic), Pin Swelling and Flow Blockage Flag は, 1 (Include EM Pin Swelling and Flow Blockage) である。

ボリューム⑳における燃料棒半径方向の温度変化の比較を Fig. 63 に示す。ブローダウン初期には, UO_2 ベレットの温度は $200^\circ C$ ほどケース B-⑭の方が高い値を示す。これは, コードのギャップコンダクタンスの取扱いの違いによるものと思われる。この差が, 圧力容器内圧力変化に影響を及ぼし, Fig. 64 に示すようにケース B-⑭の方がいつも高い圧力を示す。Fig. 17 に示す特性時刻を比較すると, 下部プレナムフラッシング時刻はケース B-⑪と比較すると 3 秒おくれる。炉心内がドライアウトになる時刻は 2 秒早くなる。

3. 解析結果の検討と結論

以上, RELAP-4J コードを用いて行った実炉 (BWR/6) の再循環ポンプ吸込側におけるギロチン破断の解析で炉心の冷却条件等に影響を及ぼすパラメータについて検討した結果, 次の結論が得られた。

本解析で使用したパラメータの中で燃料棒被ふく管表面温度に一番大きな影響を与えるのは, ギャップの物性値である。その他のパラメータは解析した範囲内ではほとんど影響を与えていない。ギャップの物性値は, 反応度事故模擬実験のように非常に早い変化に対しては詳細な研究が行われているが, LOCA のように比較的ゆっくりした変化に対する実験的研究はなされていないのが現状である。またこの物性値は, ダウンコマ水位下降速度, 下部プレナムフラッシング時刻にも大きな影響を与えている。従ってこの物性値を正しく推定する必要がある, ROSA-III 試験ではその影響を出力模擬上考慮することが必要である。

ヒートスラブの効果は, 大破断時のブローダウン過程においては比較的少ないから重要な因子ではない。二相流放出係数 C_D の効果は破断口流出流量に現われ, 従って系圧力と下部プレナムフラッシング等の特性時刻とに影響を及ぼす。流体容積のとり方の違いは, 原子炉内水位が破断口高さまで低下する時間に影響し, 従って系圧力にも影響を及ぼす。 UO_2 の物性値の違いは LOCA 過程全般に影響を及ぼすが, この程度の違いでは特性時刻に対しては大きな影響を与えない。また, Fig. 1 に示す程度の崩壊熱の相違は, 破断初期を除いて解析結果にはほとんど影響を与えない。破断口高さを下げることにより破断口までの配管長さが変わることで, この影響としては流出流量を少く見積ることになった。ECCS 水は炉心内に上部から直接流入せず, バイパス部を通して下部プレナムから炉心に流入したことがわかった。RELAP4EM (MOD3) の最適評価オプションとの比較計算では, コード内でのギャップコンダクタンスの取扱い方が違うため, 解析結果に多少の差が生じた。

次に, これらの解析をふまえて, ROSA-III 試験に関して次のことが提言できる。ROSA-III の模擬燃料棒 (電気ヒーター) には, 本解析で問題になったギャップは存在しないが, 実験では流体への伝熱量を模擬燃料棒の電気出力を制御して行うことが計画されている。したがっ

て、この電力出力の制御に関し実炉の解析結果より決定する必要がある。一つの方法は、模擬燃料棒の電気出力を実炉の解析結果の燃料棒表面熱流束に比例して減衰させる方法が考えられる。

謝 辞

本解析をすすめるにあたり、BWR/5 NRCサンプルインプットを提供いただき、その解析方法について助言をいただいた原子炉データ解析室の田辺文也氏ならびに、本研究の遂行にあたって御指導いただいた、安全工学第一研究室の斯波室長、安達公道氏、早田邦久氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 田坂完二・傍島真・鈴木光弘・斯波正誼, “冷却材喪失事故における ROSA-III と BWR との相似性の検討 (ROSA-III の予備解析)”, JAERI-M 6703 (1976).
- (2) 北口秀美・鈴木光弘・傍島真・安達公道・斯波正誼, “ROSA-III 試験の予備解析〔II〕 (再循環配管破断)”, JAERI-M 7488 (1978).
- (3) “General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6”
DOCKET-STN-50531-22, GENERAL.
- (4) Bruce C. Sliter, “Loss-of-Coolant Accident and Emergency Core Cooling Models for GE BWR”, NEDO-10329 (1971).
- (5) 望月洋志・傍島真・鈴木光弘・早田邦久・田坂完二, “軽水炉の LOCA 解析コード RELAP4J (RELAP4-MOD2 の改良について)”, JAERI-M 7506 (1978).
- (6) “WREM: Water Reactor Evaluation Model [Revision 1]”, NUREG-75/056, (1975).
- (7) A.F. Morrison, “BWR Blowdown Emergency Core Cooling Program-64 Rod Bundle Core Spray Interaction (BD/ECC1A) Test Plan”, GEAP-NUREG-21638 (1977).
- (8) 森島淳好・栗山実・原山泰雄・白鳥徹雄・泉文男・藤田操, “第一集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表”, JAERI-M 4881 (1972).
- (9) M. Sobajima, “An Analysis of Transients in Experiments on Loss-of-Coolant Accidents”, Nuclear Science and Engineering 60, 10-18 (1976)

て、この電力出力の制御に関し実炉の解析結果より決定する必要がある。一つの方法は、模擬燃料棒の電気出力を実炉の解析結果の燃料棒表面熱流束に比例して減衰させる方法が考えられる。

謝 辞

本解析をすすめるにあたり、BWR/5 NRCサンプルインプットを提供いただき、その解析方法について助言をいただいた原子炉データ解析室の田辺文也氏ならびに、本研究の遂行にあたって御指導いただいた、安全工学第一研究室の斯波室長、安達公道氏、早田邦久氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 田坂完二・傍島真・鈴木光弘・斯波正誼，“冷却材喪失事故における ROSA-III と BWR との相似性の検討 (ROSA-III の予備解析)”，JAERI-M 6703 (1976)。
- (2) 北口秀美・鈴木光弘・傍島真・安達公道・斯波正誼，“ROSA-III 試験の予備解析〔II〕 (再循環配管破断)”，JAERI-M 7488 (1978)。
- (3) “General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6”
DOCKET-STN-50531-22, GENERAL.
- (4) Bruce C. Sliter, “Loss-of-Coolant Accident and Emergency Core Cooling Models for GE BWR”, NEDO-10329 (1971)。
- (5) 望月洋志・傍島真・鈴木光弘・早田邦久・田坂完二，“軽水炉の LOCA 解析コード RELAP4J (RELAP4-MOD2 の改良について)”，JAERI-M 7506 (1978)。
- (6) “WREM: Water Reactor Evaluation Model [Revision 1]”, NUREG-75/056, (1975)。
- (7) A.F. Morrison, “BWR Blowdown Emergency Core Cooling Program-64 Rod Bundle Core Spray Interaction (BD/ECC1A) Test Plan”, GEAP-NUREG-21638 (1977)。
- (8) 森島淳好・栗山実・原山泰雄・白鳥徹雄・泉文男・藤田操，“第一集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表”，JAERI-M 4881 (1972)。
- (9) M. Sobajima, “An Analysis of Transients in Experiments on Loss-of-Coolant Accidents”, Nuclear Science and Engineering 60, 10-18 (1976)

て、この電力出力の制御に関し実炉の解析結果より決定する必要がある。一つの方法は、模擬燃料棒の電気出力を実炉の解析結果の燃料棒表面熱流束に比例して減衰させる方法が考えられる。

謝 辞

本解析をすすめるにあたり、BWR/5 NRCサンプルインプットを提供いただき、その解析方法について助言をいただいた原子炉データ解析室の田辺文也氏ならびに、本研究の遂行にあたって御指導いただいた、安全工学第一研究室の斯波室長、安達公道氏、早田邦久氏に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 田坂完二・傍島真・鈴木光弘・斯波正誼, “冷却材喪失事故における ROSA-III と BWR との相似性の検討 (ROSA-III の予備解析)”, JAERI-M 6703 (1976).
- (2) 北口秀美・鈴木光弘・傍島真・安達公道・斯波正誼, “ROSA-III 試験の予備解析〔II〕 (再循環配管破断)”, JAERI-M 7488 (1978).
- (3) “General Electric Standard Safety Analysis Report, BWR/6”
DOCKET-STN-50531-22, GENERAL.
- (4) Bruce C. Sliter, “Loss-of-Coolant Accident and Emergency Core Cooling Models for GE BWR”, NEDO-10329 (1971).
- (5) 望月洋志・傍島真・鈴木光弘・早田邦久・田坂完二, “軽水炉の LOCA 解析コード RELAP4J (RELAP4-MOD2 の改良について)”, JAERI-M 7506 (1978).
- (6) “WREM: Water Reactor Evaluation Model [Revision 1]”, NUREG-75/056, (1975).
- (7) A.F. Morrison, “BWR Blowdown Emergency Core Cooling Program-64 Rod Bundle Core Spray Interaction (BD/ECC1A) Test Plan”, GEAP-NUREG-21638 (1977).
- (8) 森島淳好・栗山実・原山泰雄・白鳥徹雄・泉文男・藤田操, “第一集 燃料設計に必要な物性値及び計算図表”, JAERI-M 4881 (1972).
- (9) M. Sobajima, “An Analysis of Transients in Experiments on Loss-of-Coolant Accidents”, Nuclear Science and Engineering 60, 10-18 (1976)

Table 1. BWR / 6 計算ケース (ポンプ吸込側側ギロチン破断)

ケース	C _D	ECCS	HEAT SLAB	DECAY HEAT	UO ₂ と CLADDING の熱伝導率と比熱	UO ₂ と CLADDING の線膨張係数	GAP の熱伝導率と比熱	その他
B-①	0.57	なし	なし	(1)(2) 前報の値	前報の値	前報の値	前報の値	$C_D = 0.57 + \frac{0.002}{X}$
B-②	0.57	なし	あり	前報の値	前報の値	前報の値	前報の値	$C_D = 0.57 + \frac{0.002}{X}$
B-③	1.0	なし	なし	前報の値	前報の値	前報の値	前報の値	
B-④	1.0	なし	なし	前報の値	前報の値	前報の値	前報の値	下部プレナム - 2000 ft ³ 上部ダウンカム + 1000 ft ³ パイパス + 1000 ft ³
B-⑤	1.0	なし	なし	ROSA-III 実験初期に用いられる値	NRC サンプルインプット値	前報の値	前報の値	
B-⑥	1.0	なし	なし	前報の値	NRC サンプルインプット値	前報の値	前報の値	
B-⑦	1.0	なし	なし	前報の値	NRC サンプルインプット値	NRC サンプルインプット値	NRC サンプルインプット値	
B-⑧	1.0	なし	なし	ROSA-III 実験初期に用いられる値	NRC サンプルインプット値	NRC サンプルインプット値	NRC サンプルインプット値	
B-⑨	1.0	あり	なし	前報の値	NRC サンプルインプット値	前報の値	前報の値	
B-⑩	0.57	なし	なし	GE + 3σ	NEDO 10329	GESSAR	DATA BOOK	$C_D = 0.57 + \frac{0.002}{X}$
B-⑪	1.0	なし	なし	GE + 3σ	NEDO 10329	GESSAR	DATA BOOK	
B-⑫	1.0	なし	なし	GE + 3σ	NEDO 10329	GESSAR	DATA BOOK	BREAK LEVEL が ROSA-III と同じ高さ割合
B-⑬	1.0	あり	なし	GE + 3σ	NEDO 10329	GESSAR	DATA BOOK	
B-⑭	1.0	なし	なし	GE + 3σ	NEDO 10329	GESSAR	DATA BOOK	使用コードは, RELAP-4 EM (Mod 3) コード 010003 は, 1110

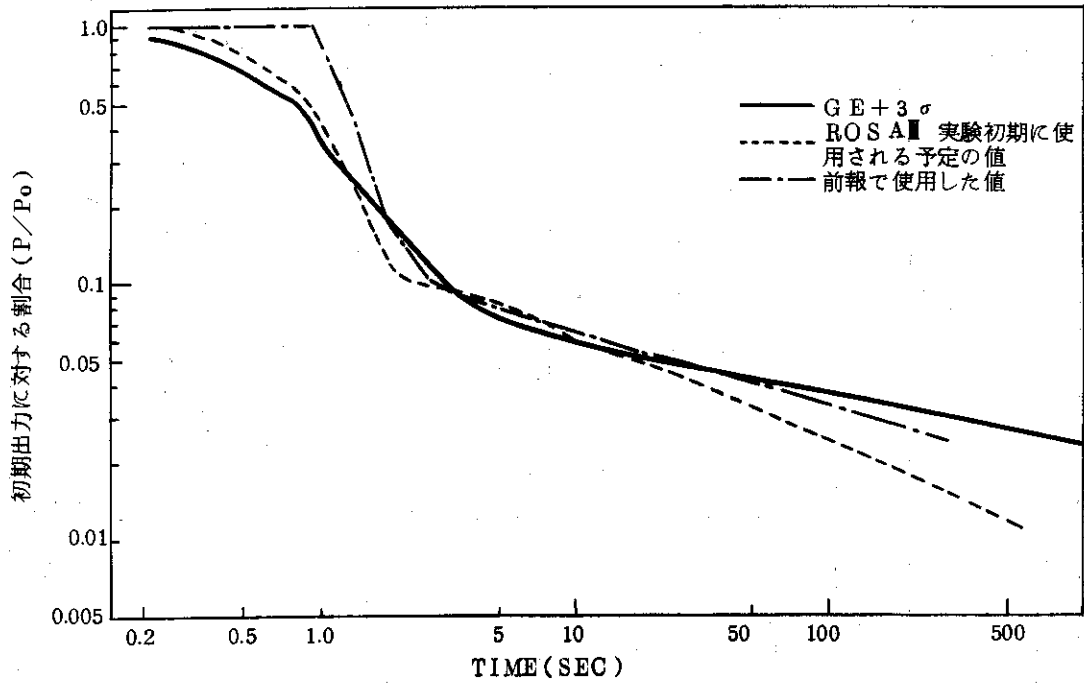


Fig. 1 インプットに使用した崩壊熱

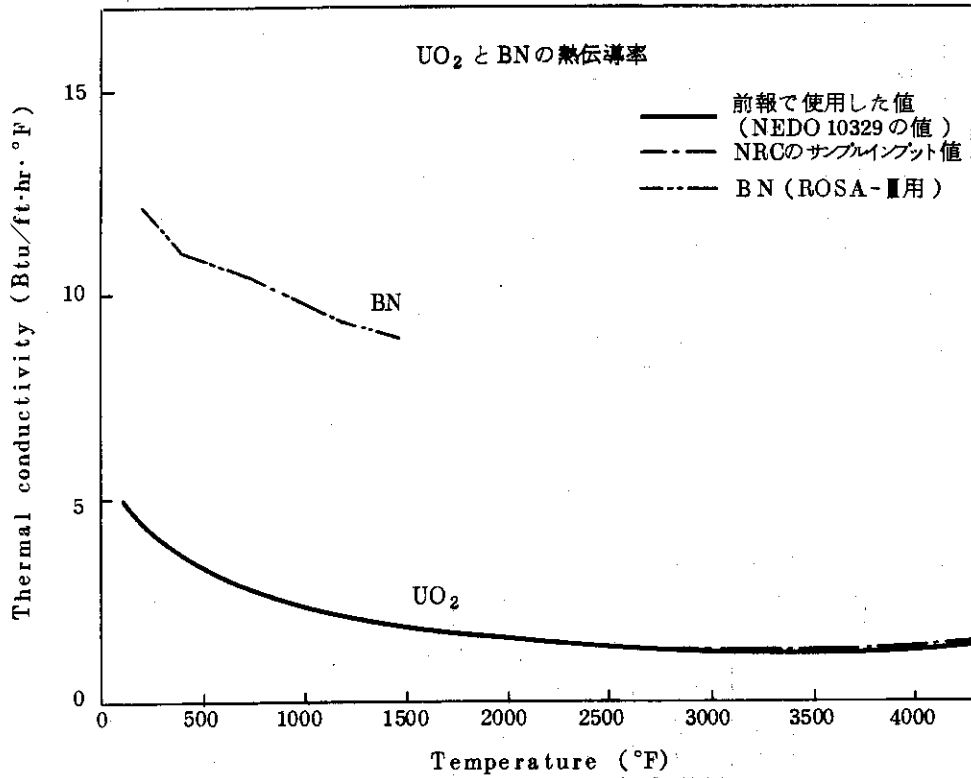


Fig. 2 UO_2 とBNの熱伝導率

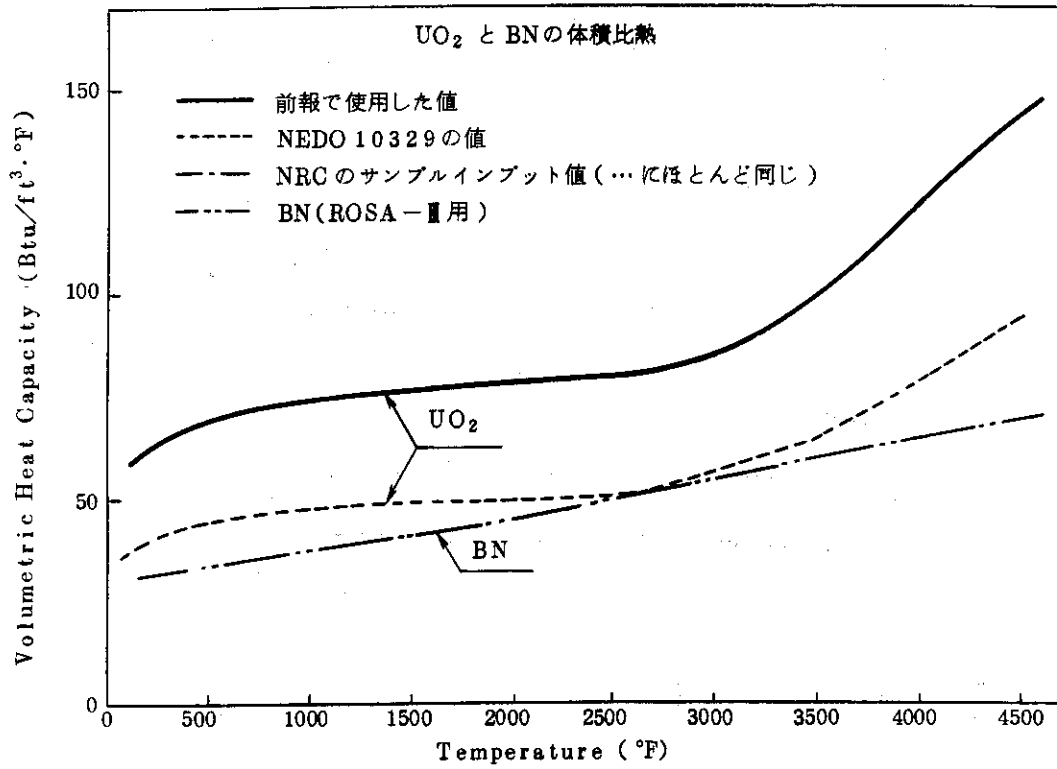


Fig. 3 UO₂ と BN の体積比熱

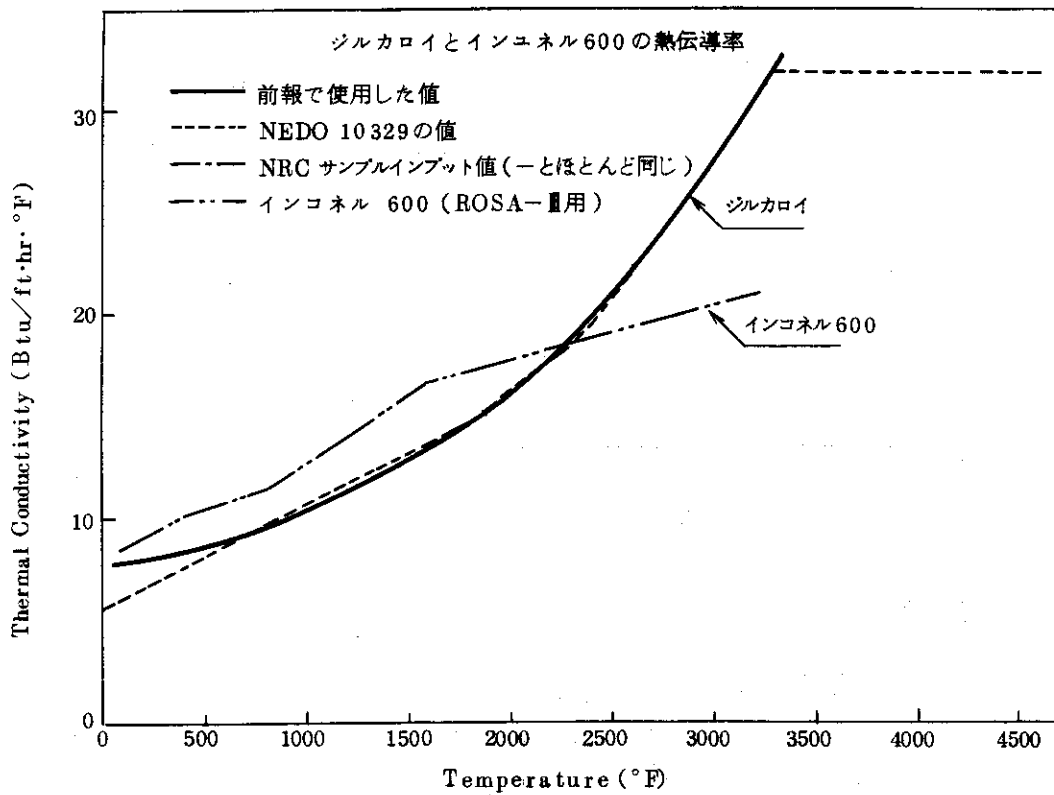


Fig. 4 ジルカロイとインコネル600の熱伝導率

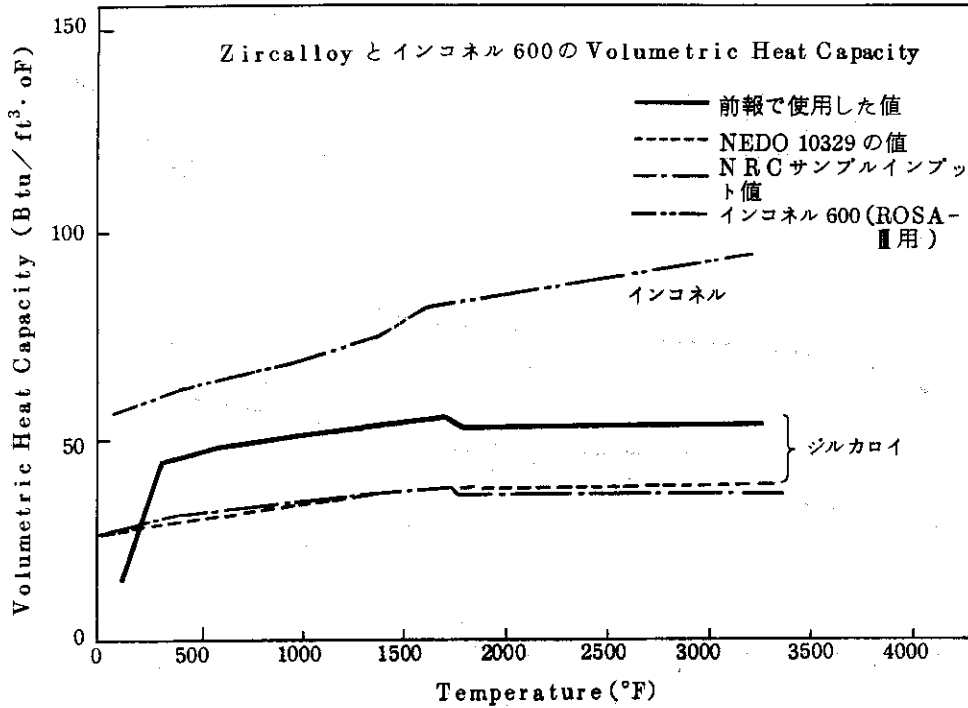


Fig. 5 ジルカロイとインコネル 600 の体積比熱

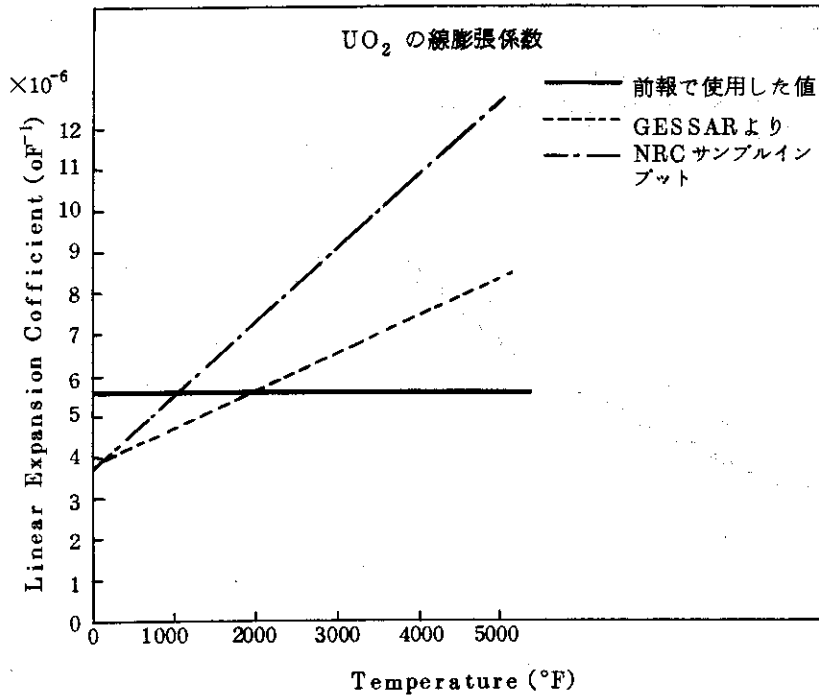


Fig. 6 インプットに使用した UO₂ の線膨張係数

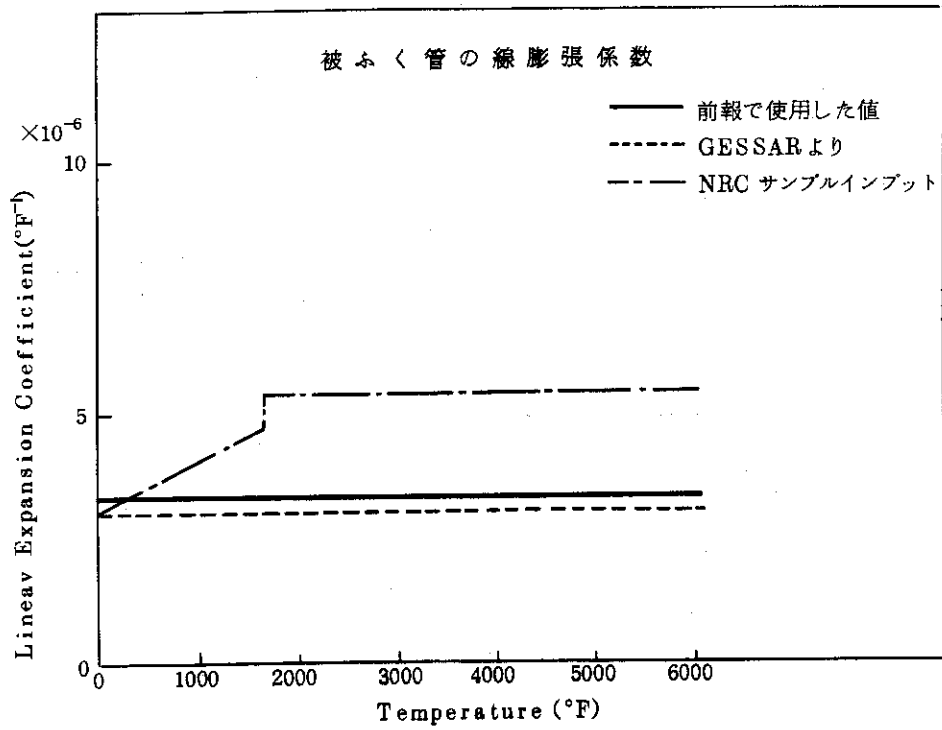


Fig. 7 インプットに使用した被ふく管の線膨張係数

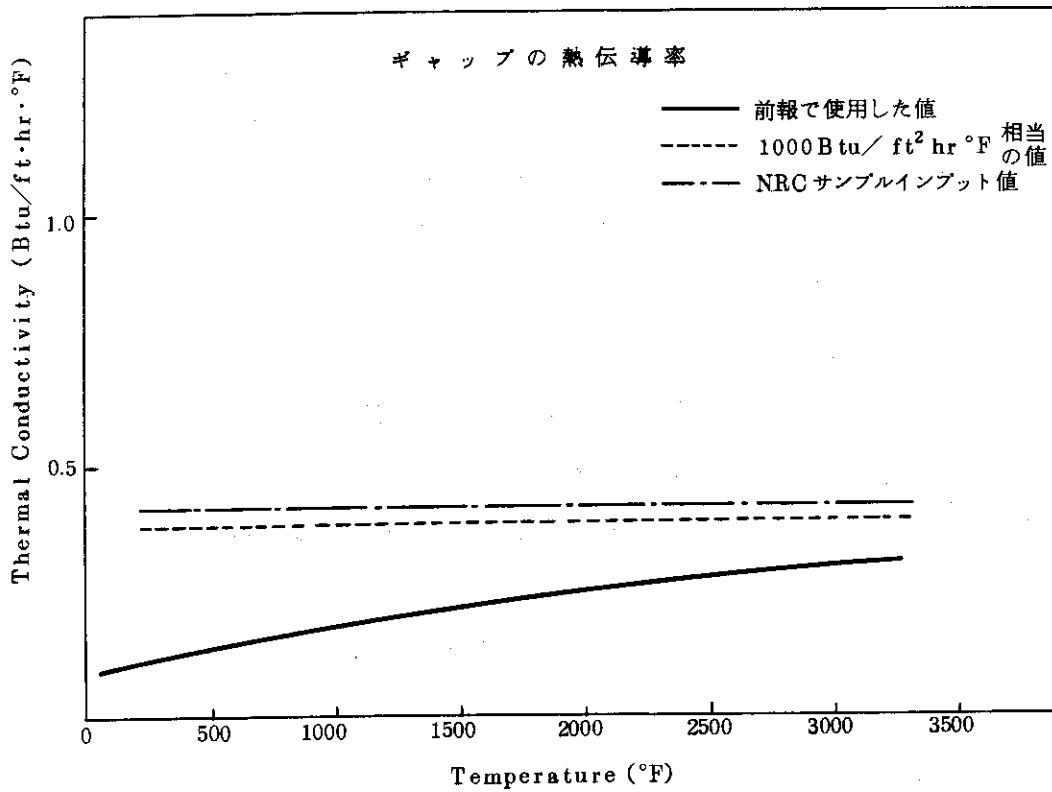


Fig. 8 インプットに使用したギャップの熱伝導率

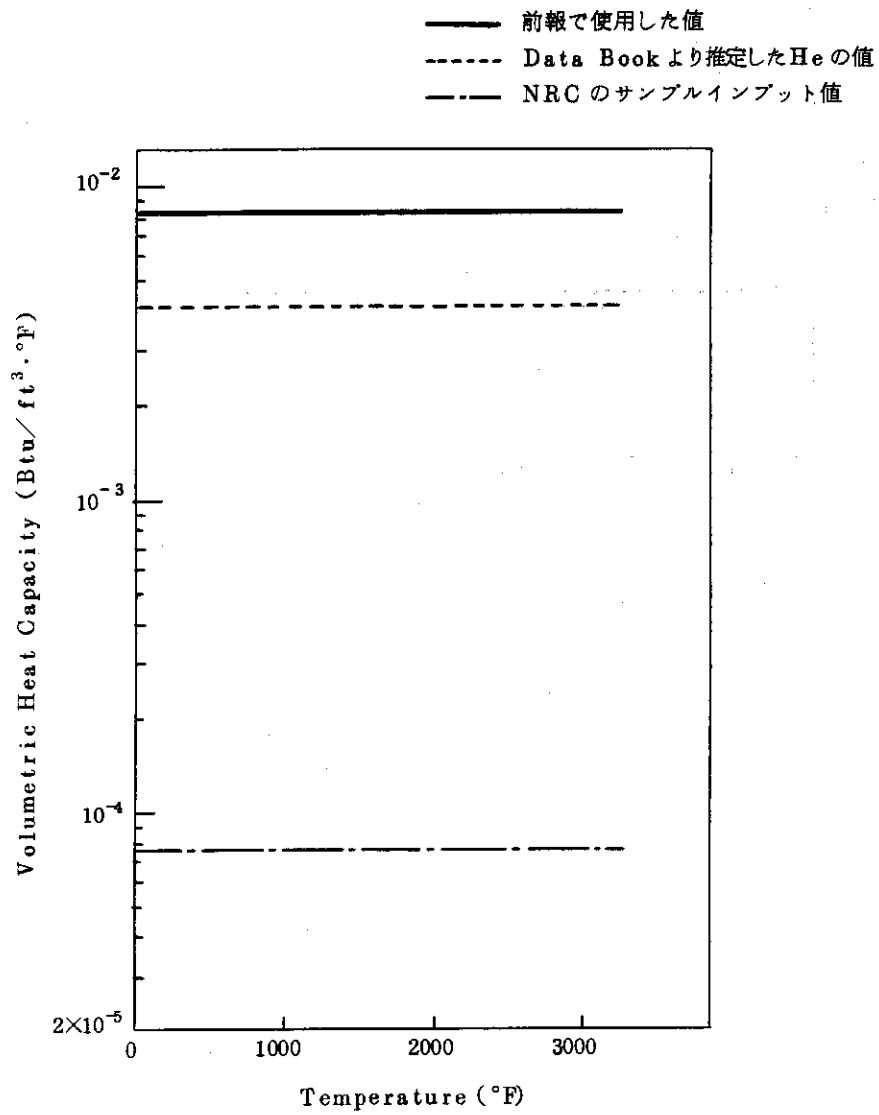


Fig. 9 インプットに使用したギャップの体積比熱

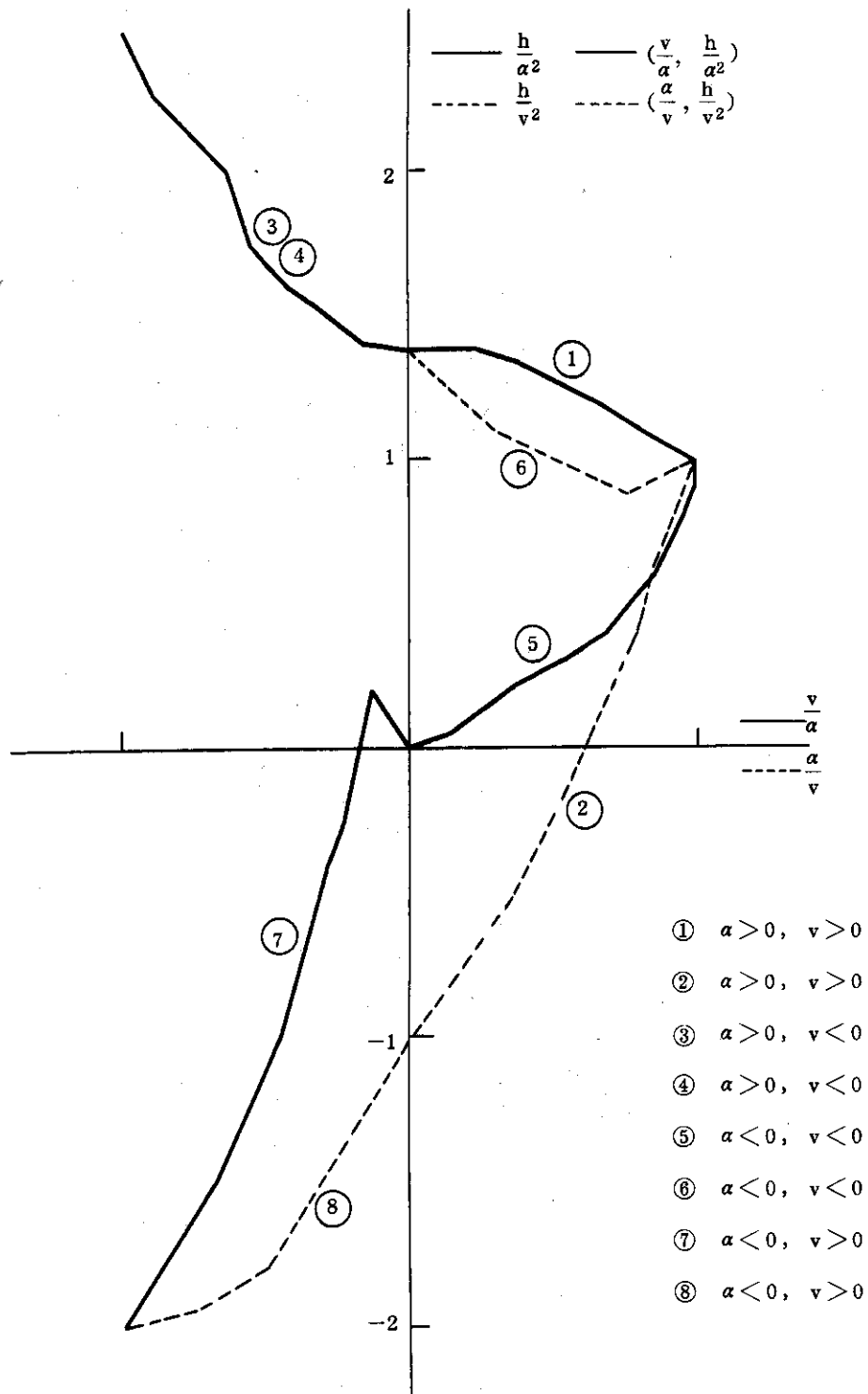


Fig. 10 BINGHAMポンプのヘッド曲線

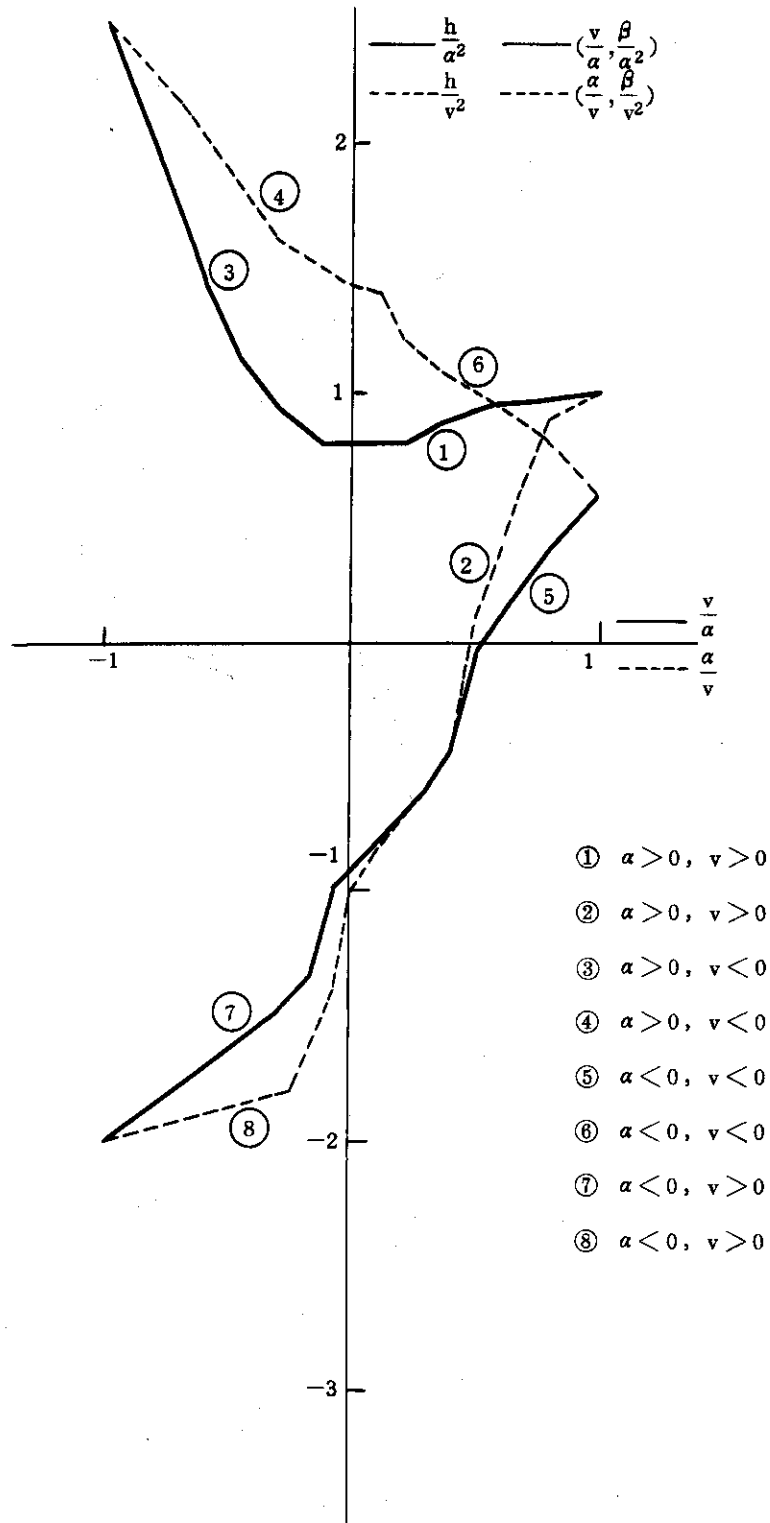


Fig. 11 BINGHAMポンプのトルク曲線

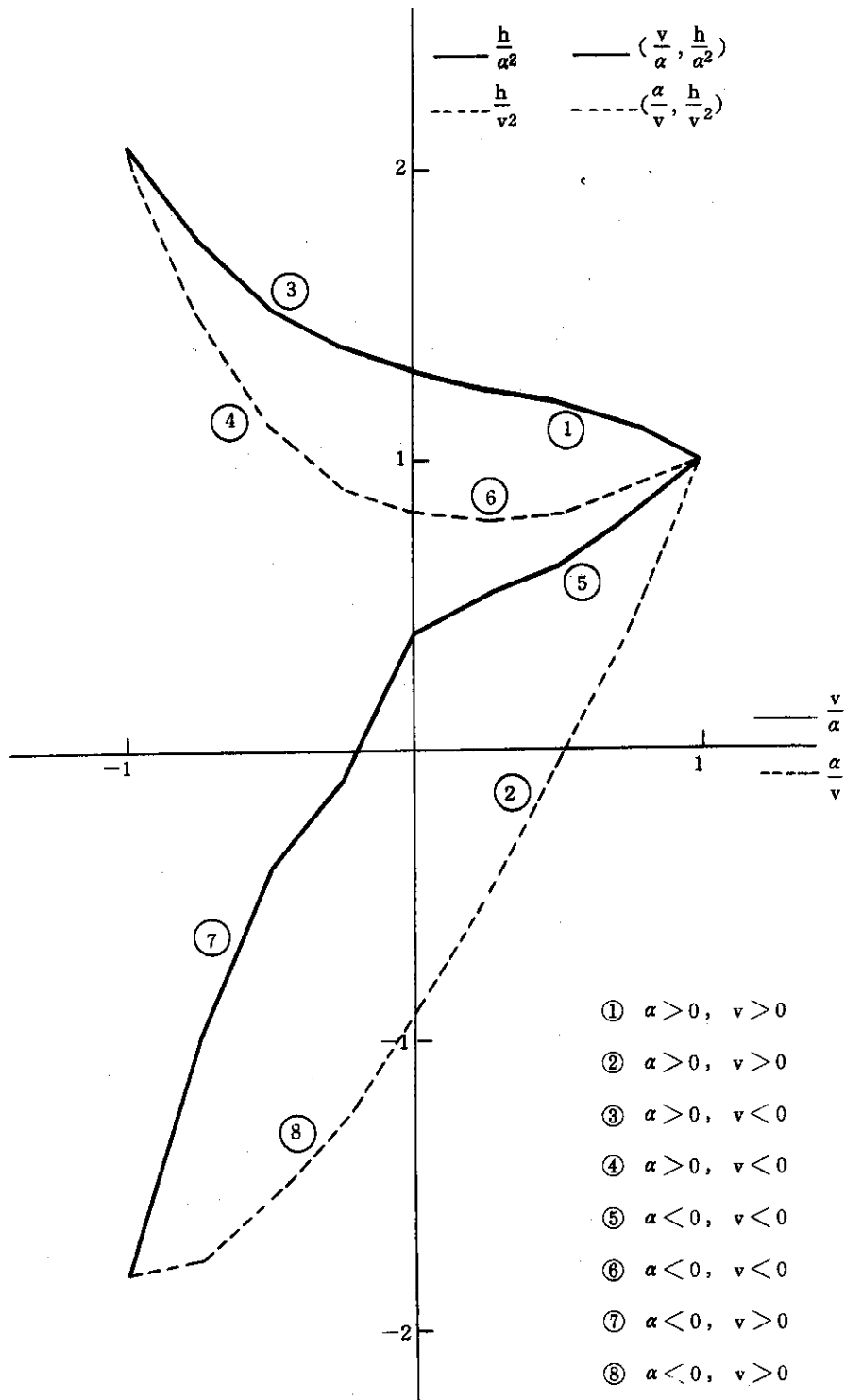


Fig. 12 BWR/5ポンプのヘッド曲線

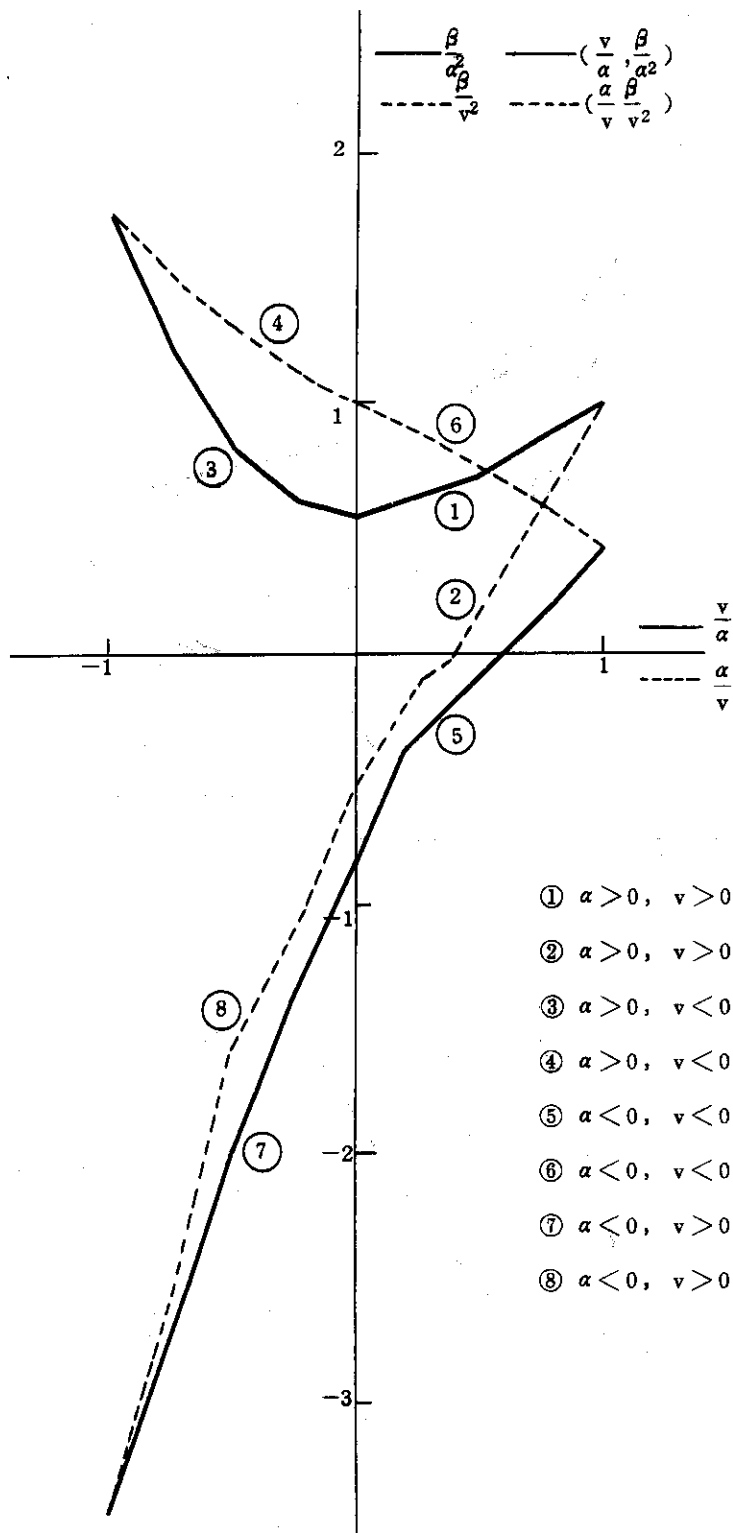


Fig. 13 BWR/5ポンプのトルク曲線

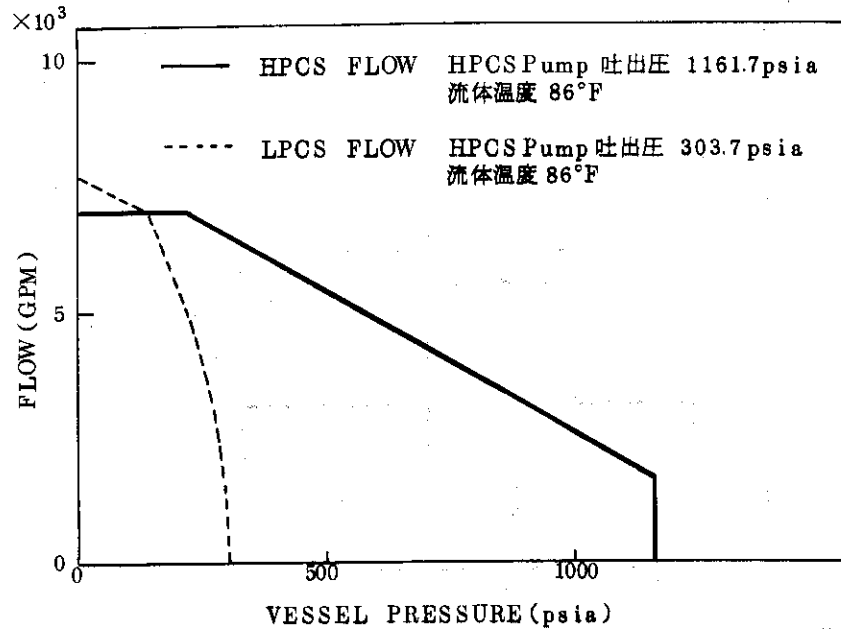


Fig. 14 BWR/6用HPCS, LPCS注入流量と系圧力の関係

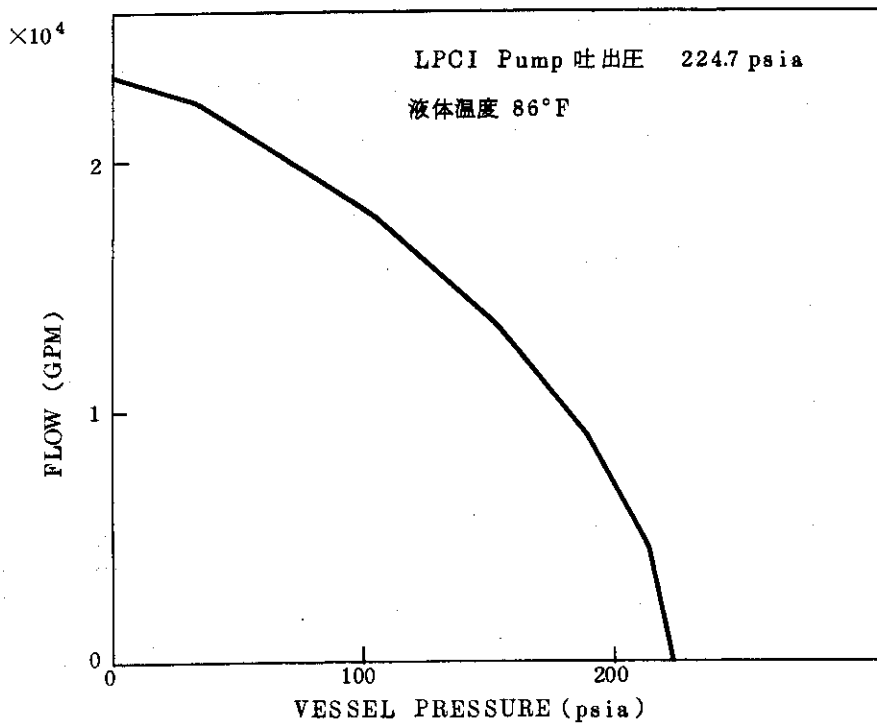


Fig. 15 BWR/6用3LPCI注入流量と系圧力の関係

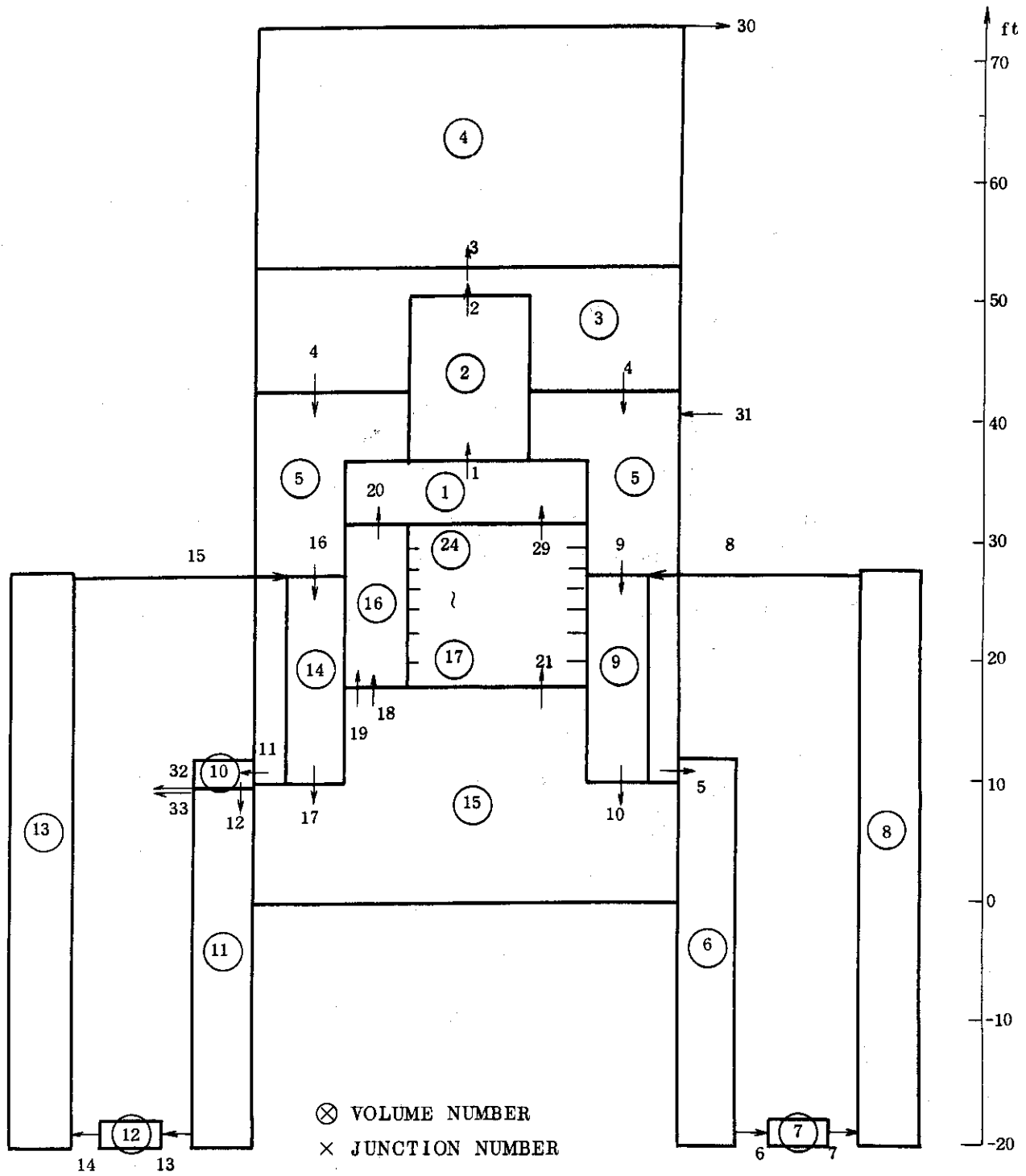


Fig. 16 BWR解析用ボリュームとジャンクション構成

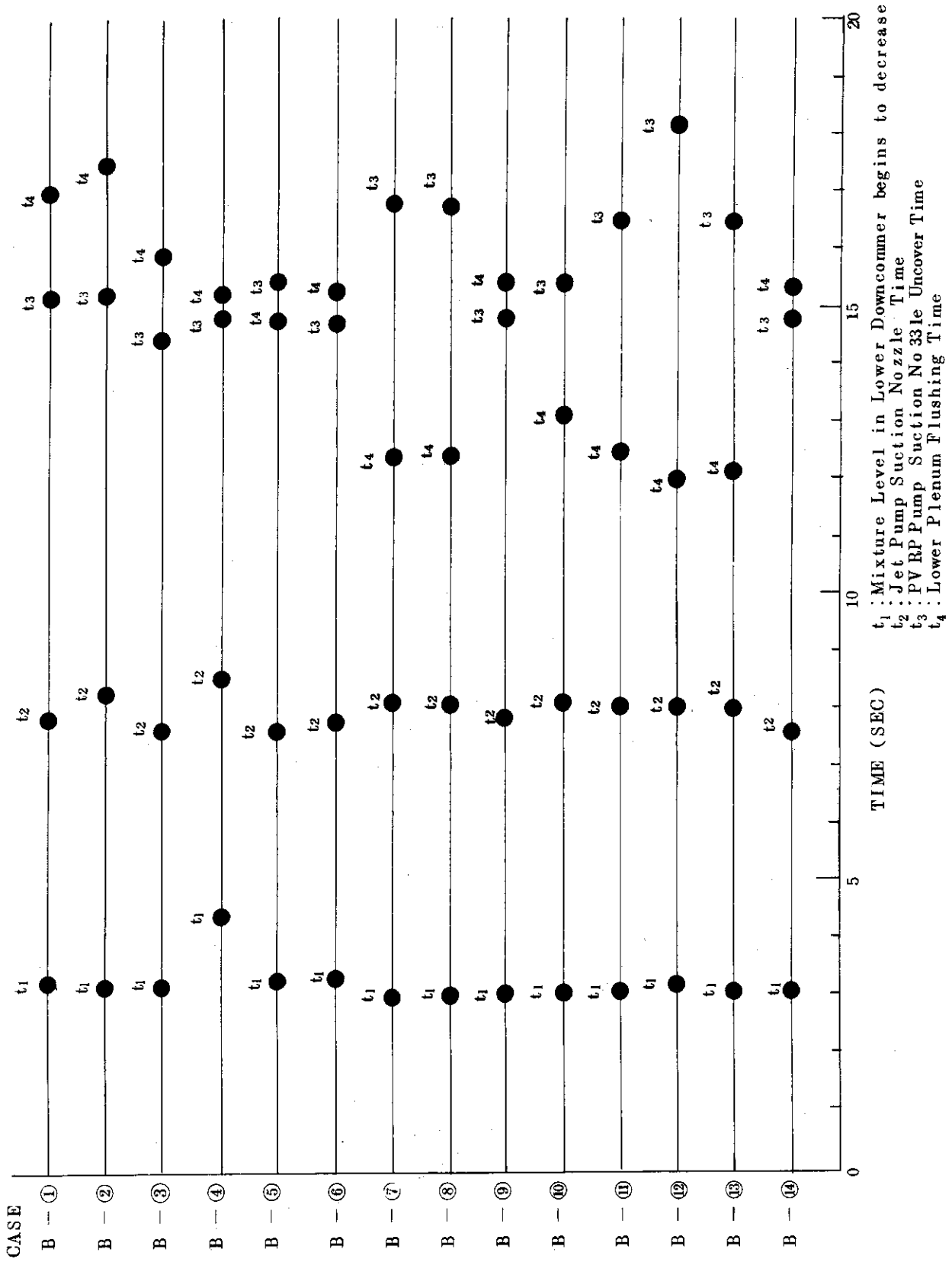


Fig. 17 破断後の特性時刻の比較

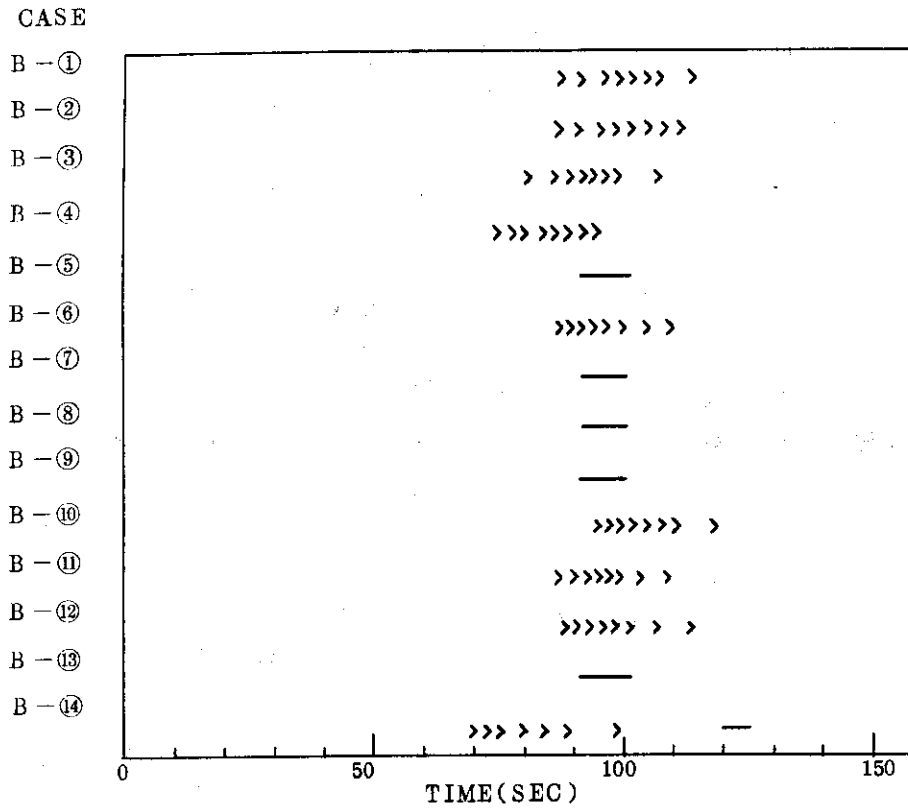


Fig. 18 炉心の完全露出(ドライアウト)時刻の比較

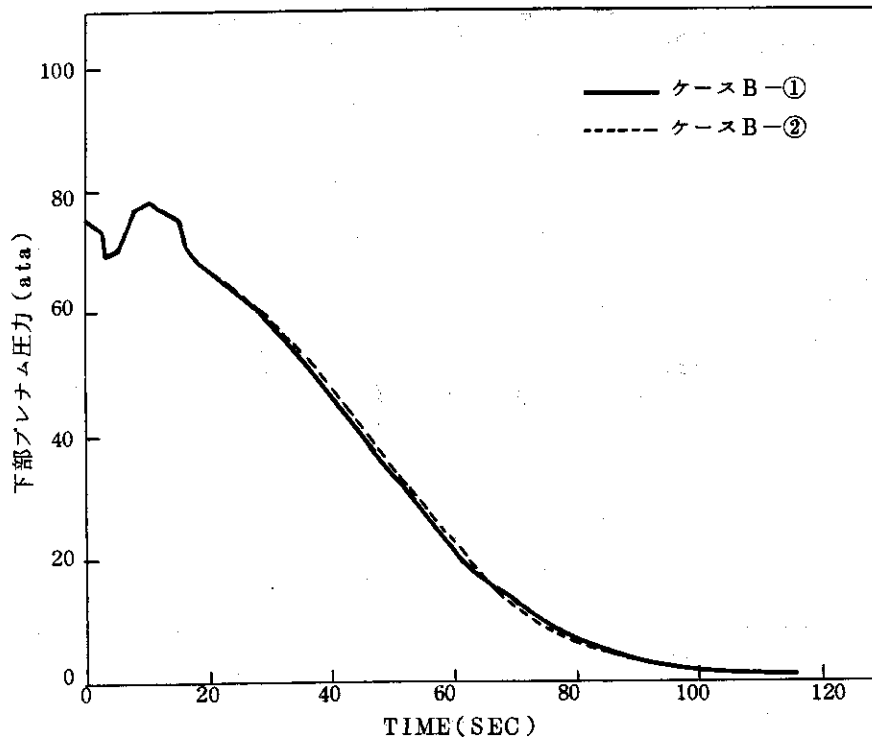


Fig. 19 ケース B-①, ②の下部プレナム圧力

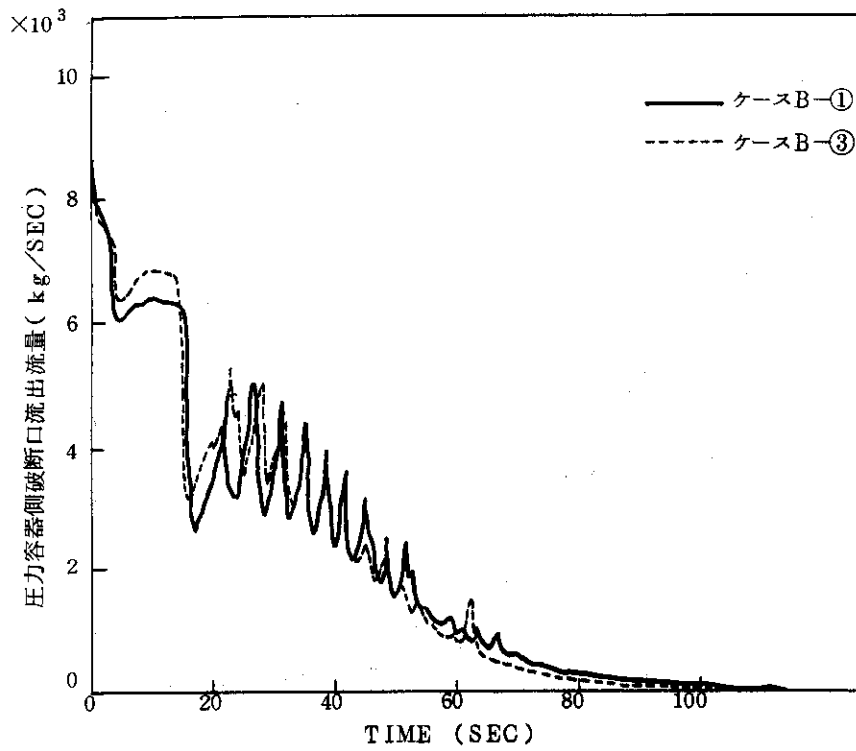


Fig. 20 ケースB-①, ③のPV側流出流量

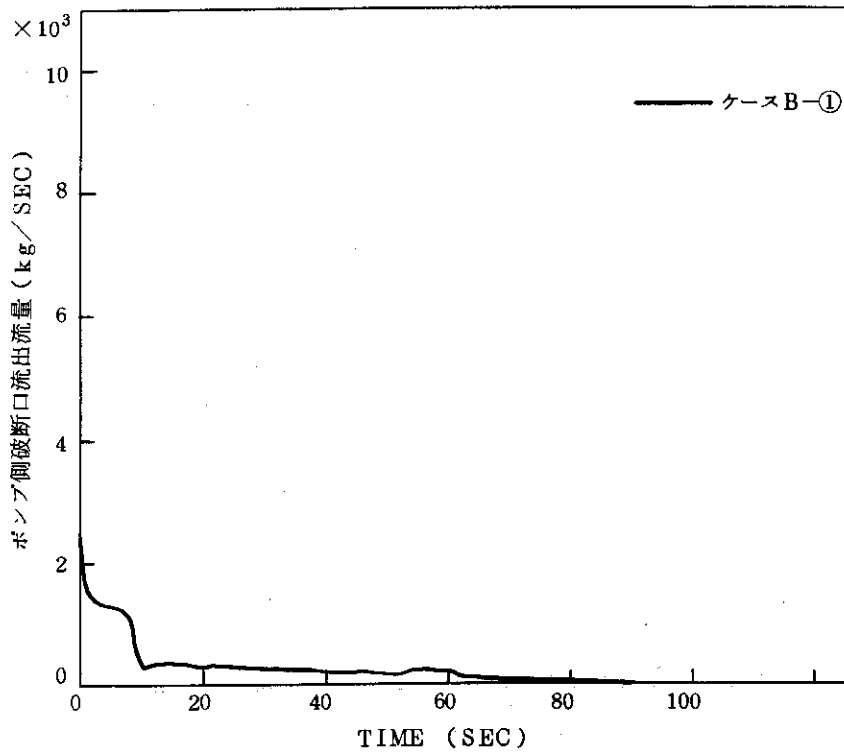


Fig. 21 ケースB-①のポンプ側流出流量

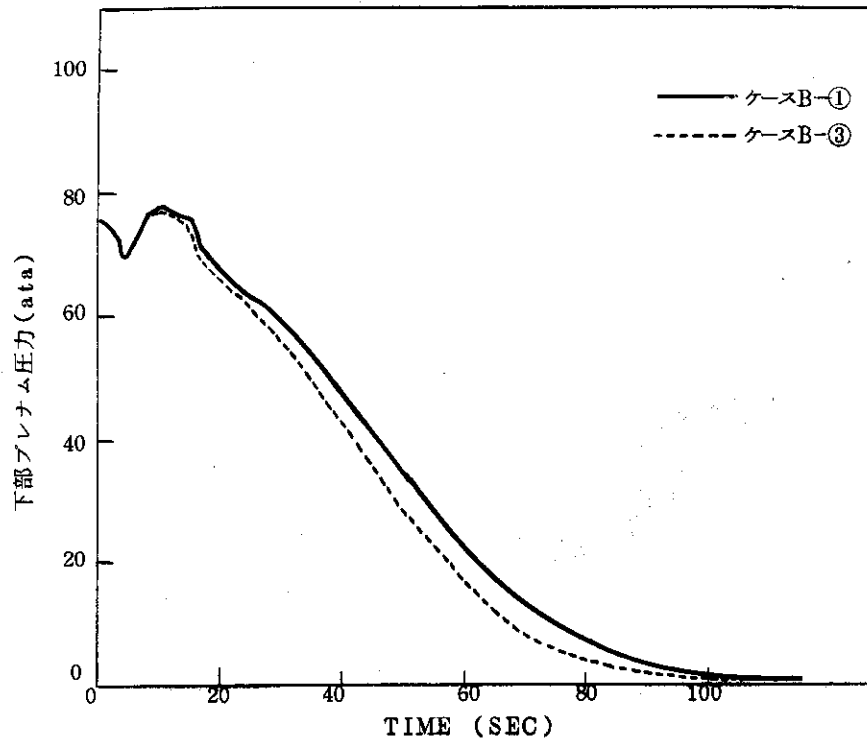


Fig. 22 ケース B-①, ③の下部プレナム圧力

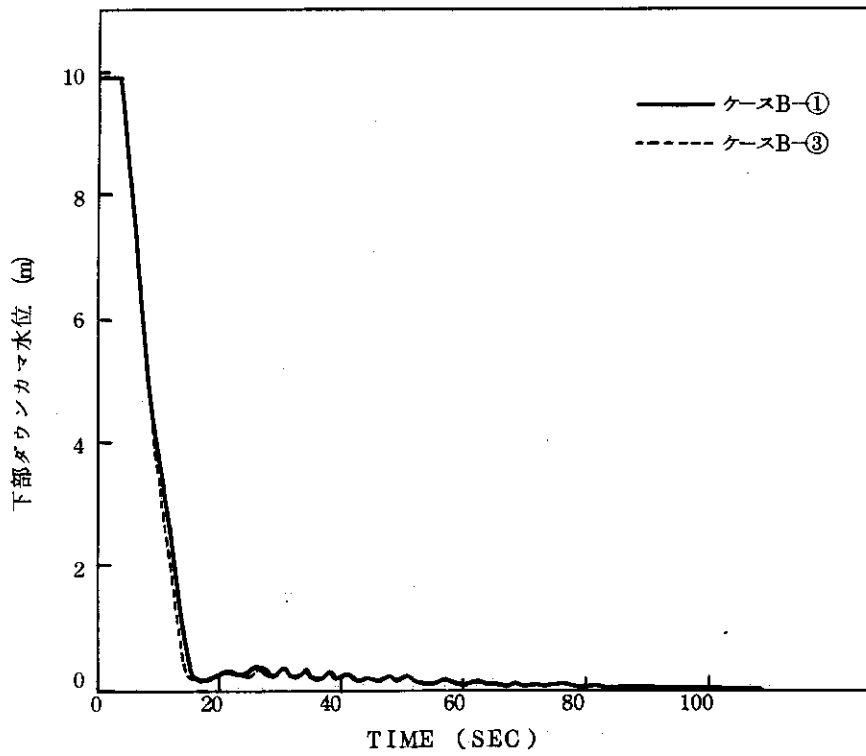


Fig. 23 ケース B-①, ③の下部ダウンカマ水位

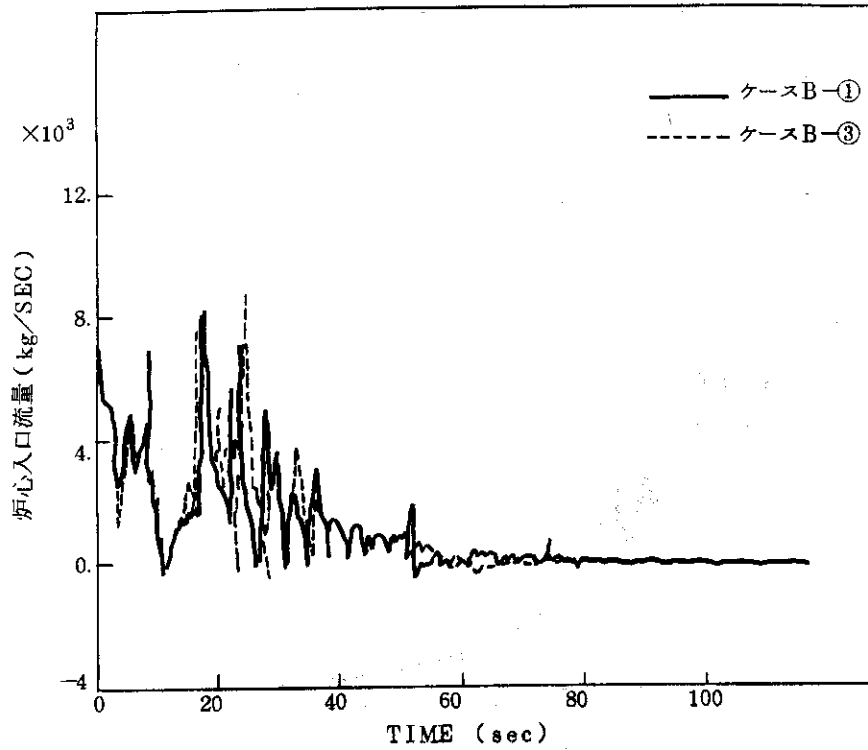


Fig. 24 ケースB-①, ③の炉心入口流量

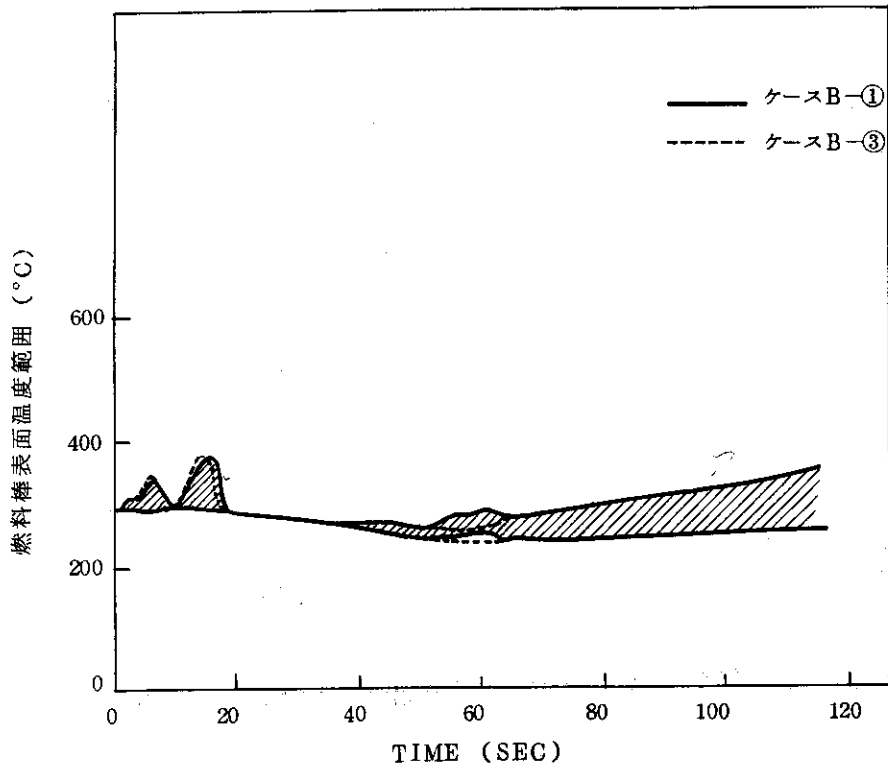


Fig. 25 ケースB-①, ③の燃料棒被ふく管表面温度の範囲

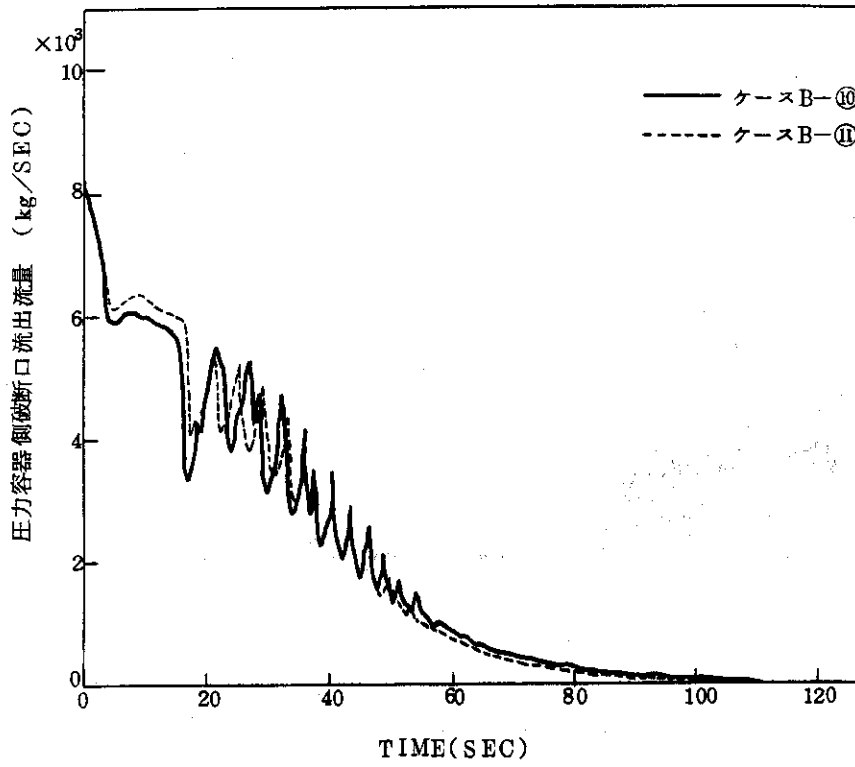


Fig. 26 ケースB-⑩, ⑪のPV側流出流量

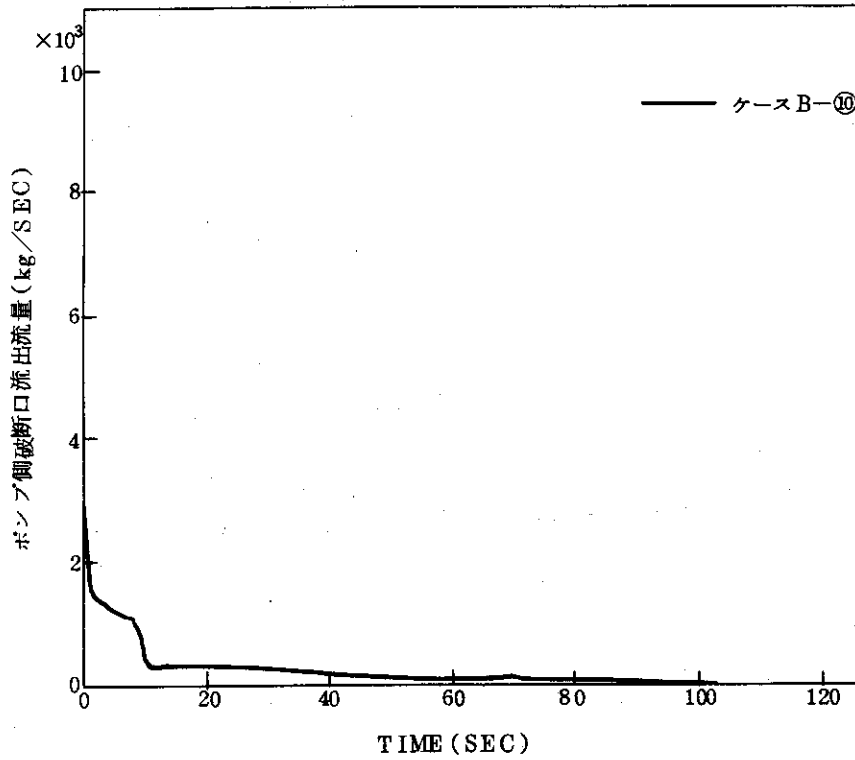


Fig. 27 ケースB-⑩のポンプ側流出流量

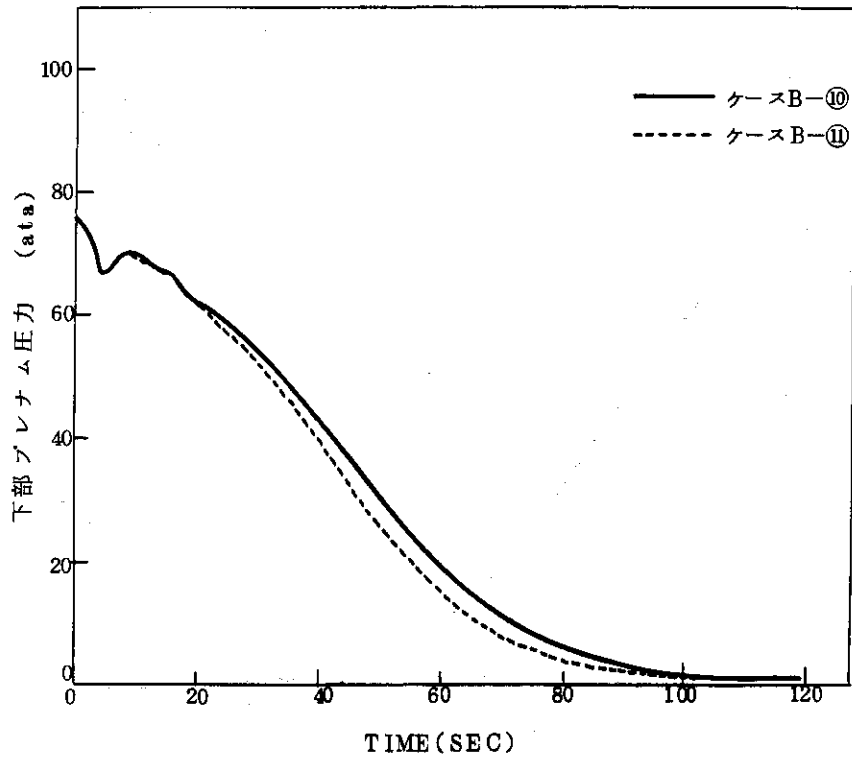


Fig. 28 ケース B-⑩, ⑪の下部ピレナム圧力

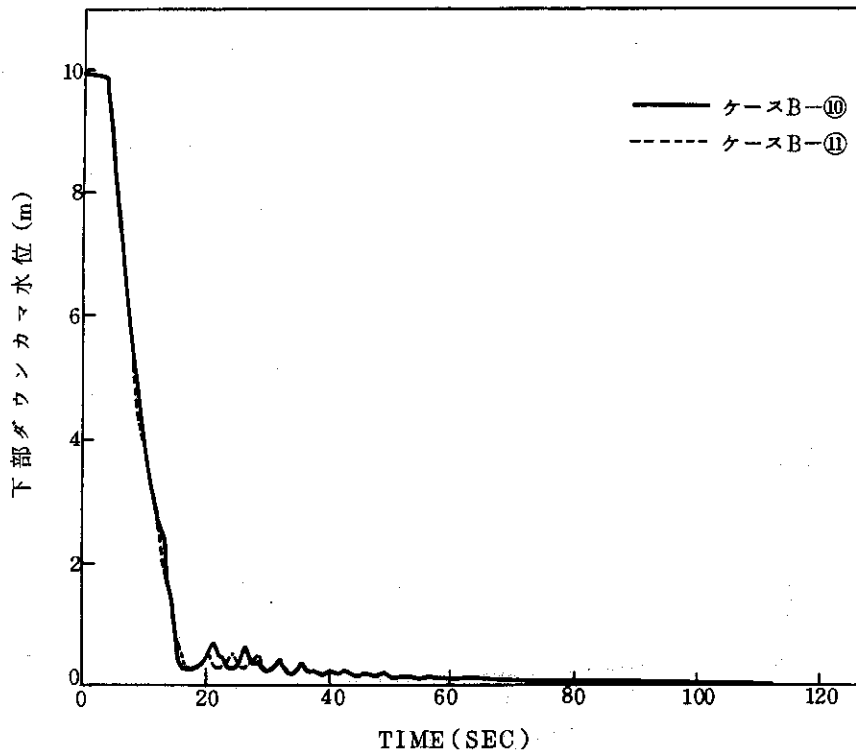


Fig. 29 ケース B-⑩, ⑪の下部ダウンコマ水位

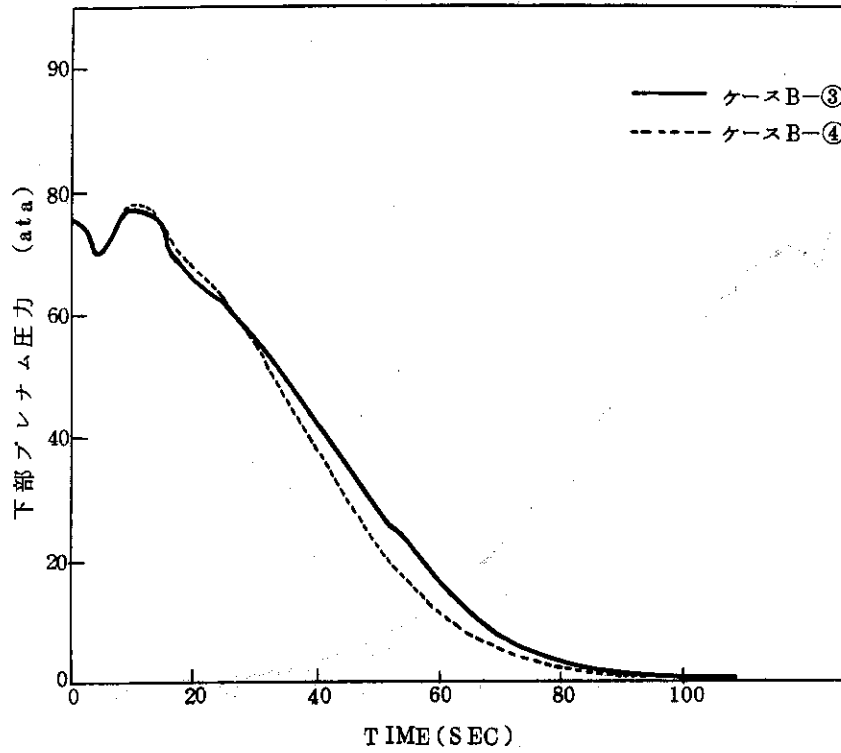


Fig. 30 ケース B-③, ④の下部プレナム圧力

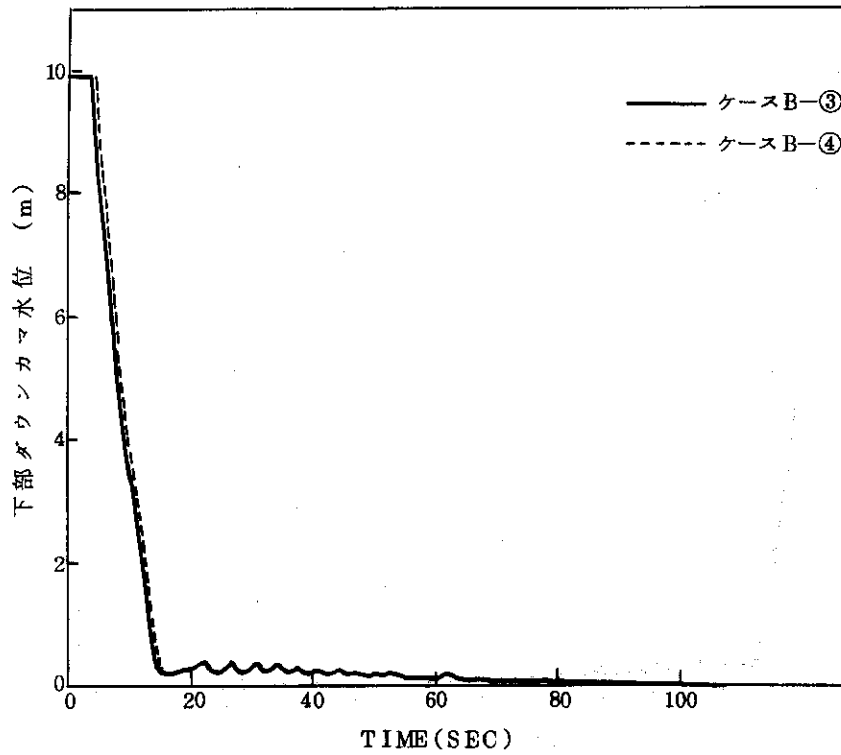


Fig. 31 ケース B-③, ④の下部ダウンカマ水位

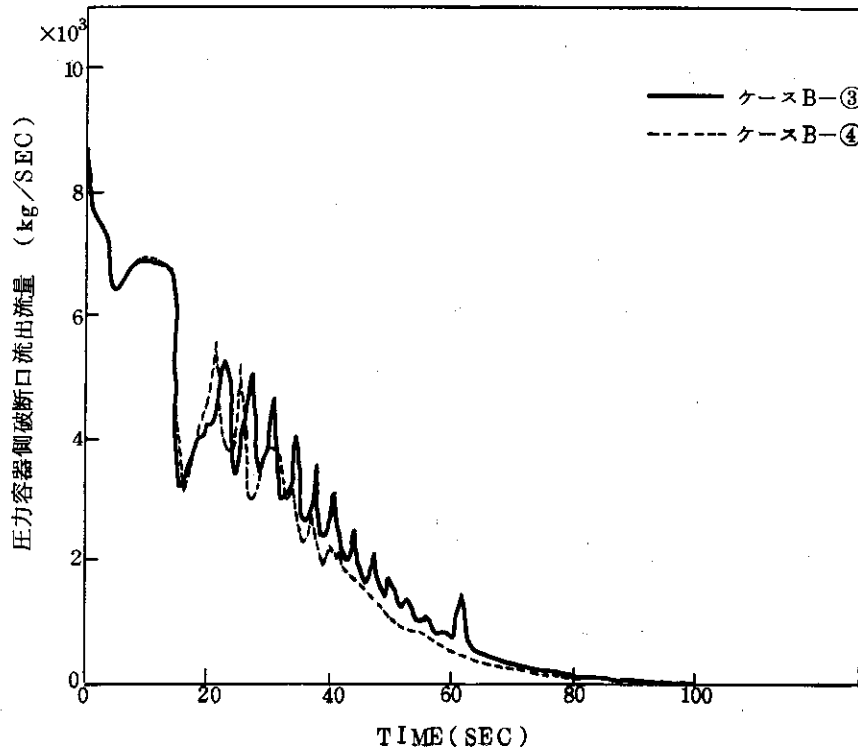


Fig. 32 ケースB-③, ④のPV側流出流量

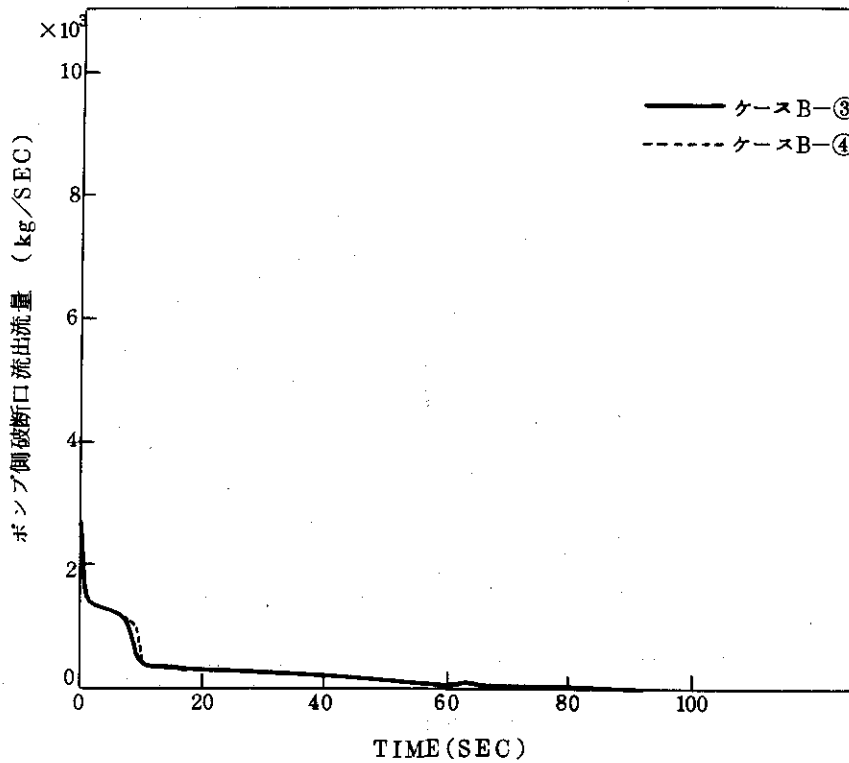


Fig. 33 ケースB-③, ④のポンプ側流出流量

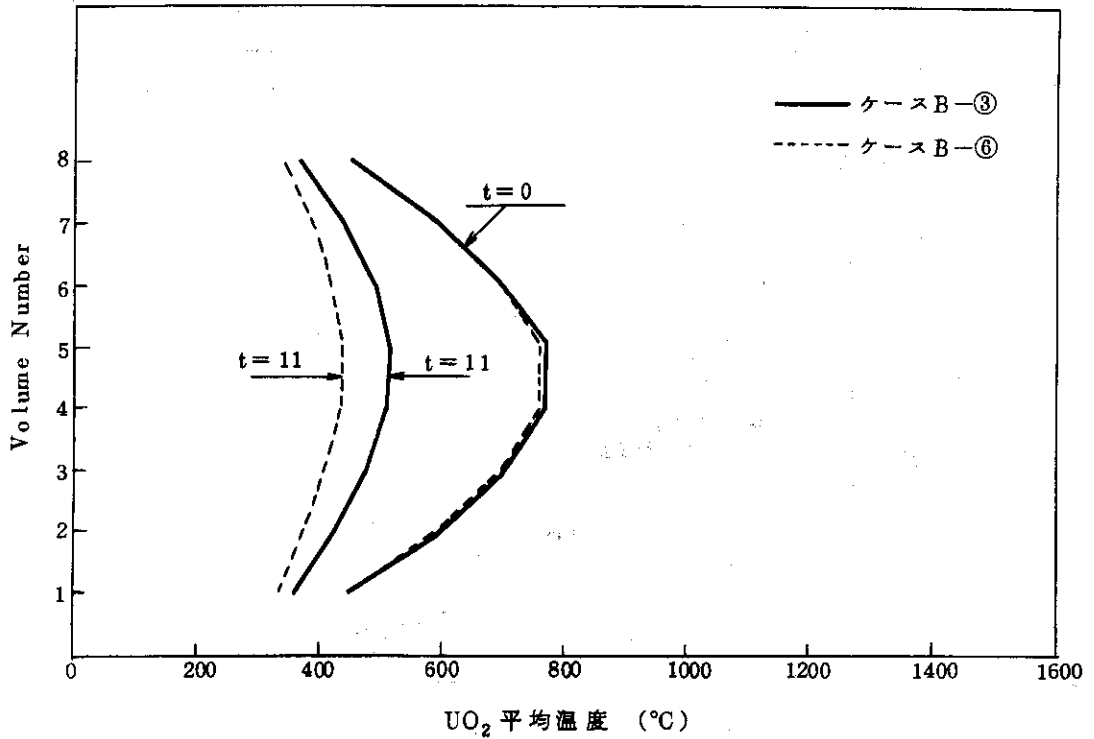


Fig. 34 ケースB-③, ④の炉心各ボリュームにおける UO_2 平均温度

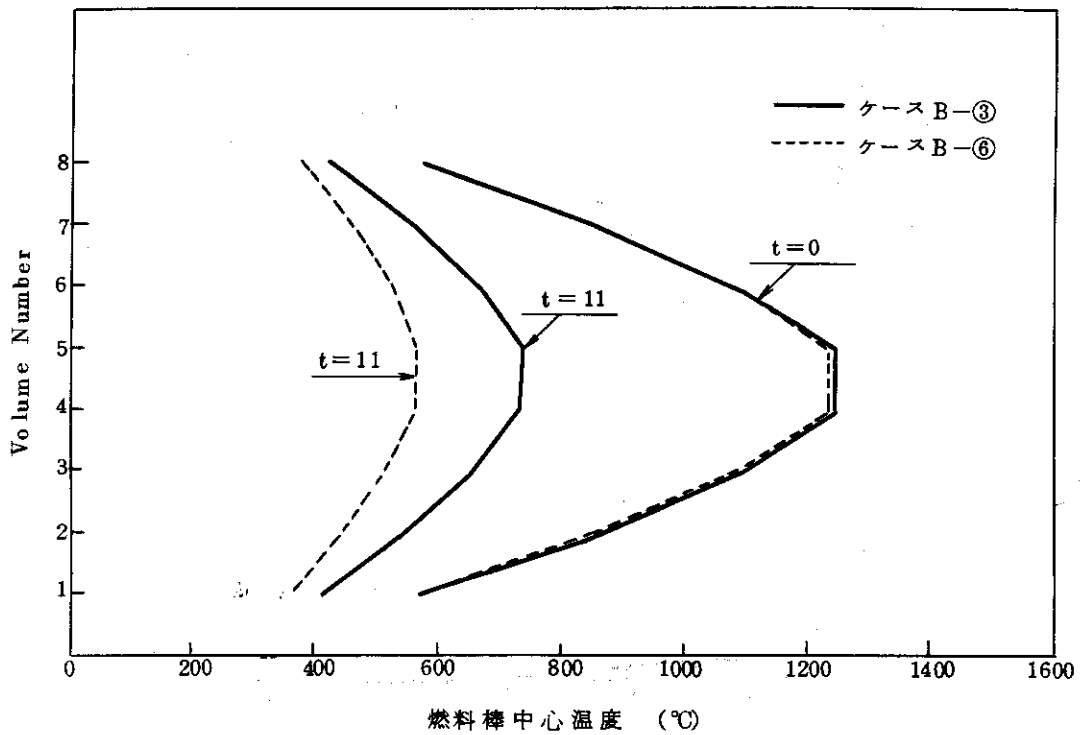


Fig. 35 ケースB-③, ④の炉心各ボリュームにおける燃料棒中心温度

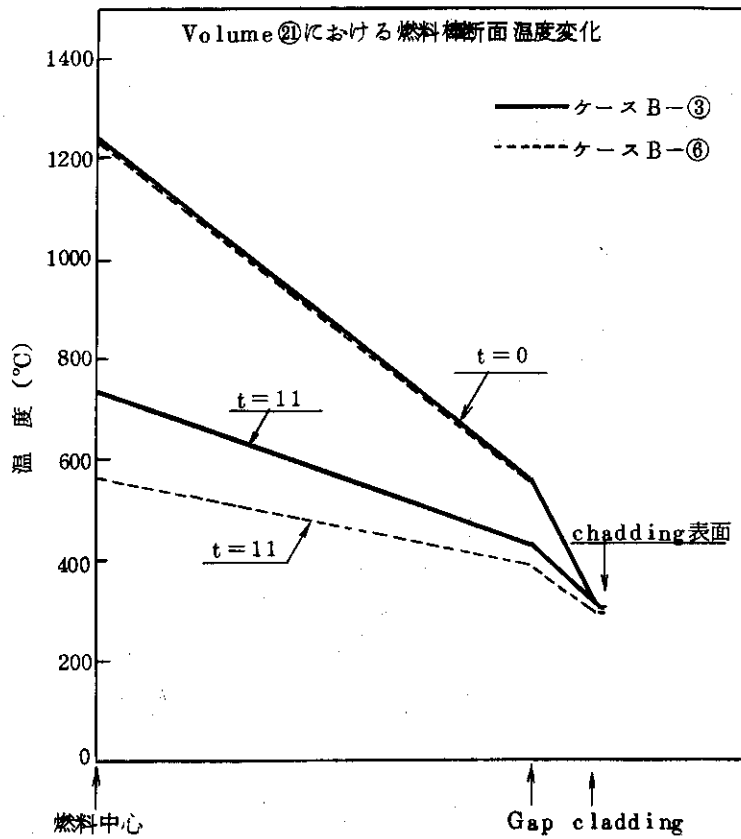


Fig. 36 ケース B-③, ⑥の vol 21における半径方向の燃料棒温度分布

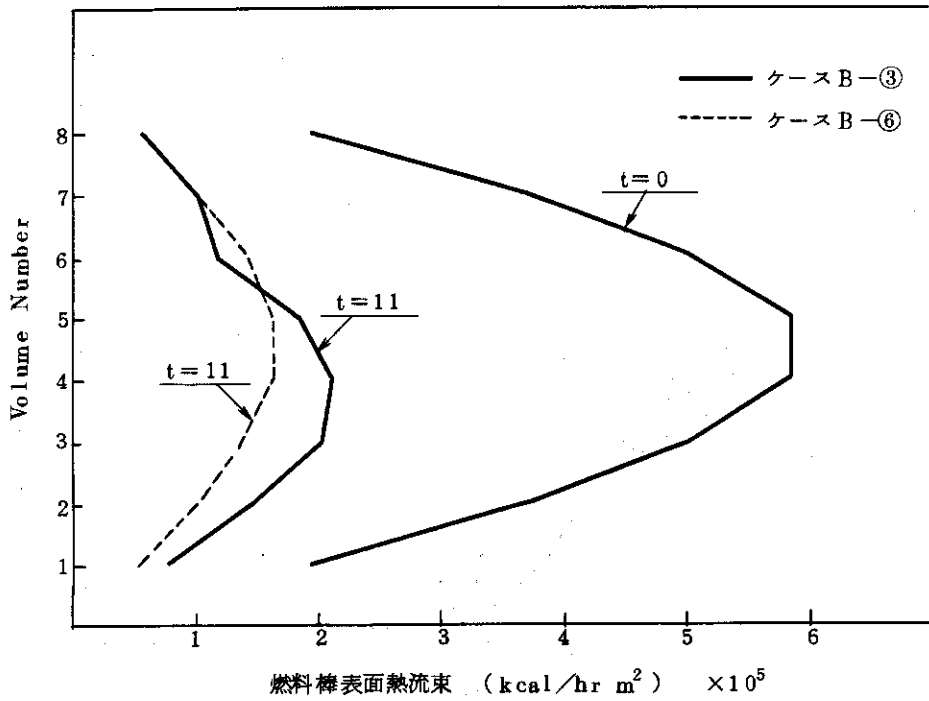


Fig. 37 ケース B-③, ⑥の炉心各ボリュームにおける燃料棒表面熱流束

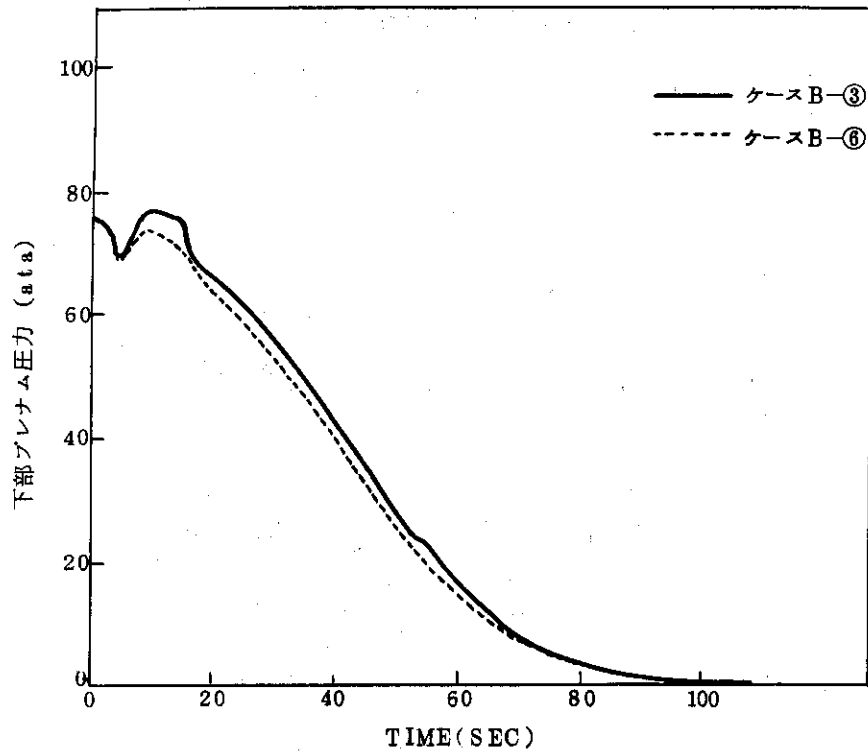


Fig. 38 ケースB-③, ⑥の下部プレナム圧力

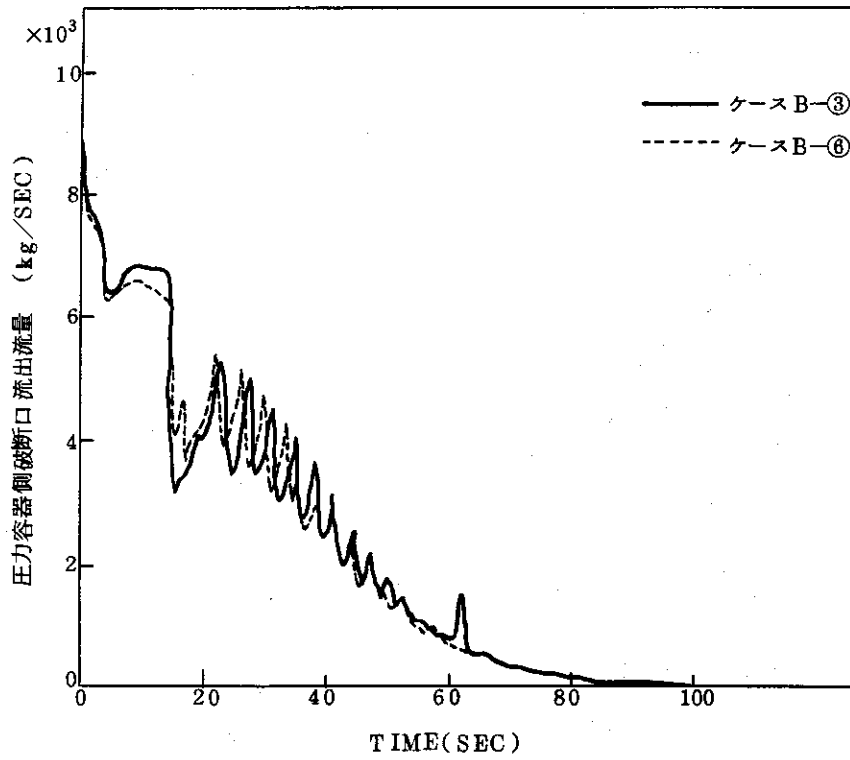


Fig. 39 ケースB-③, ⑥のPV側流出流量

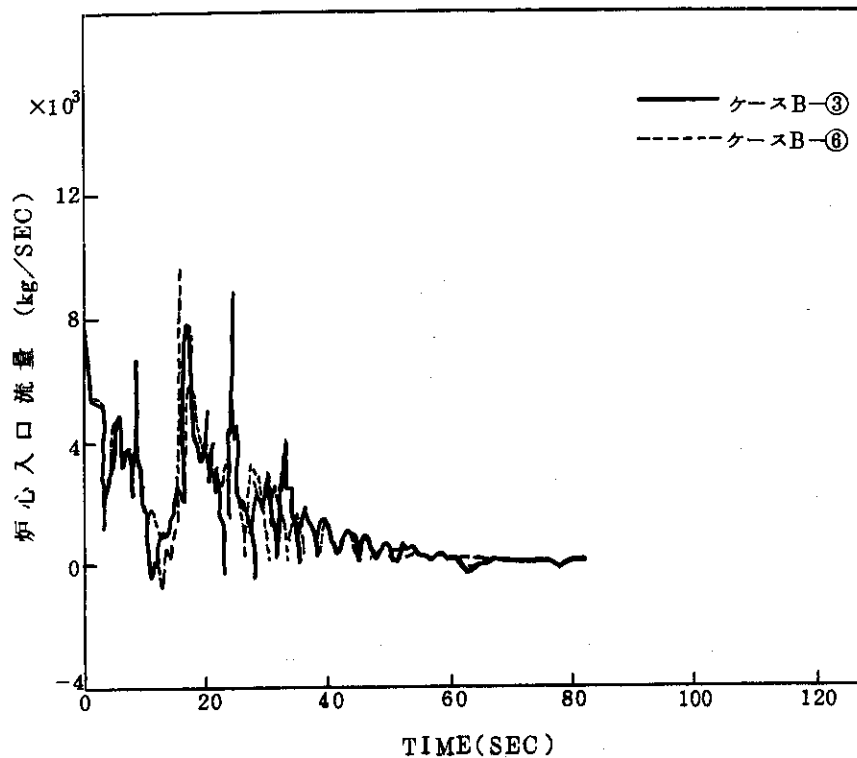


Fig. 40 ケースB-③, ⑥の炉心入口流量

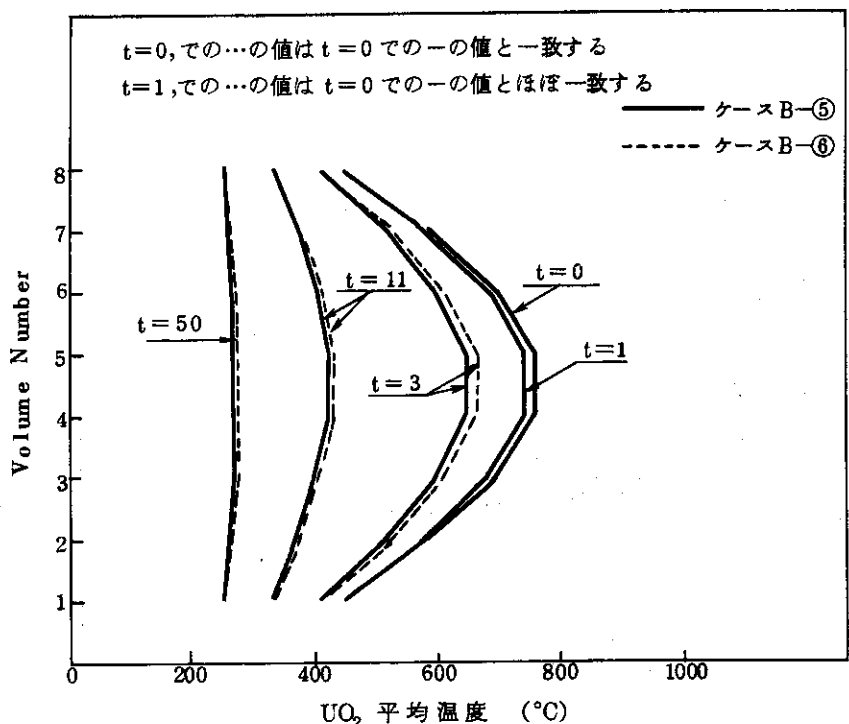


Fig. 41 ケースB-⑤, ⑥の炉心各ボリュームにおける UO_2 平均温度

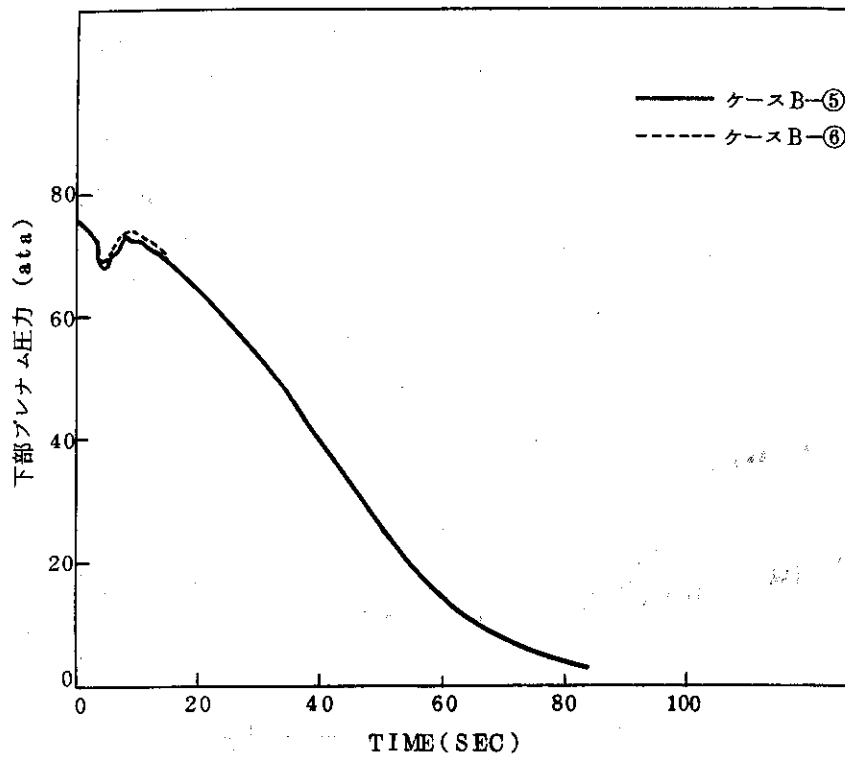


Fig. 42 ケース B-⑤, ⑥における下部ピトー管圧力

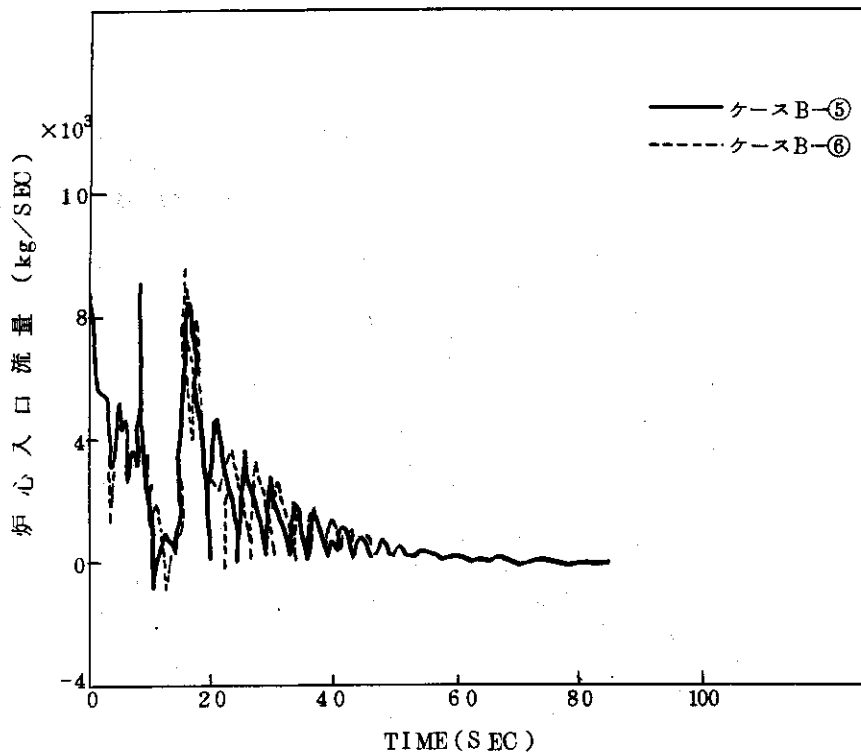


Fig. 43 ケース B-⑤, ⑥における炉心入口流量

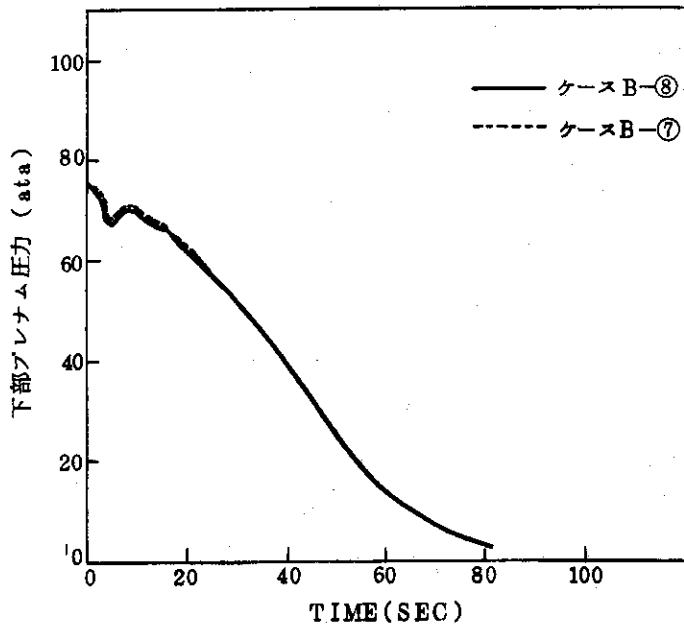


Fig. 44 ケース B-⑦, ⑧における下部プレナム圧力

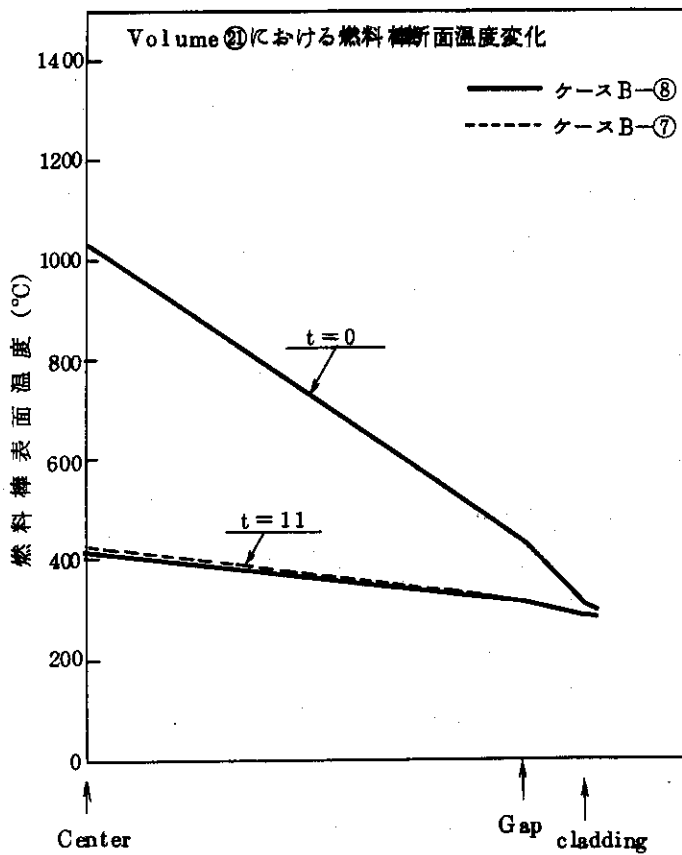


Fig. 45 ケース B-⑦, ⑧の vol ②における半径方向の燃料棒温度分布

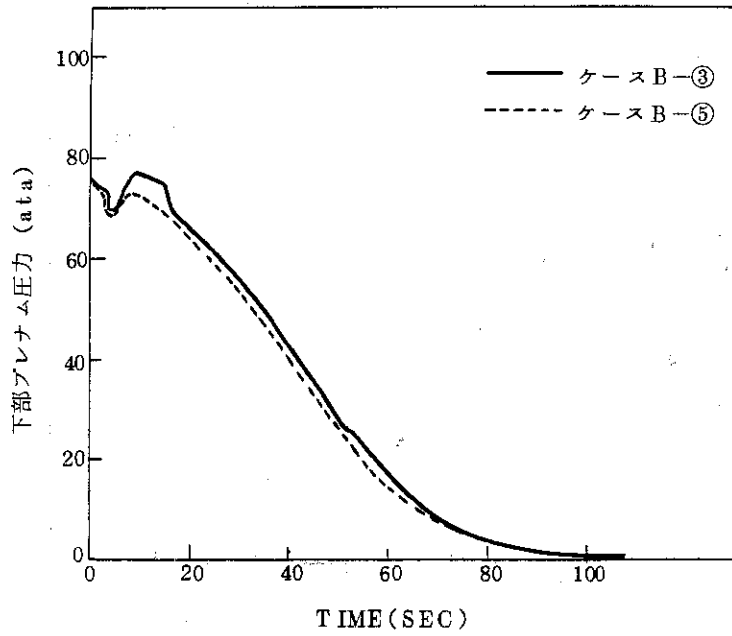


Fig. 46 ケースB-③, ⑤の下部プレナム圧力

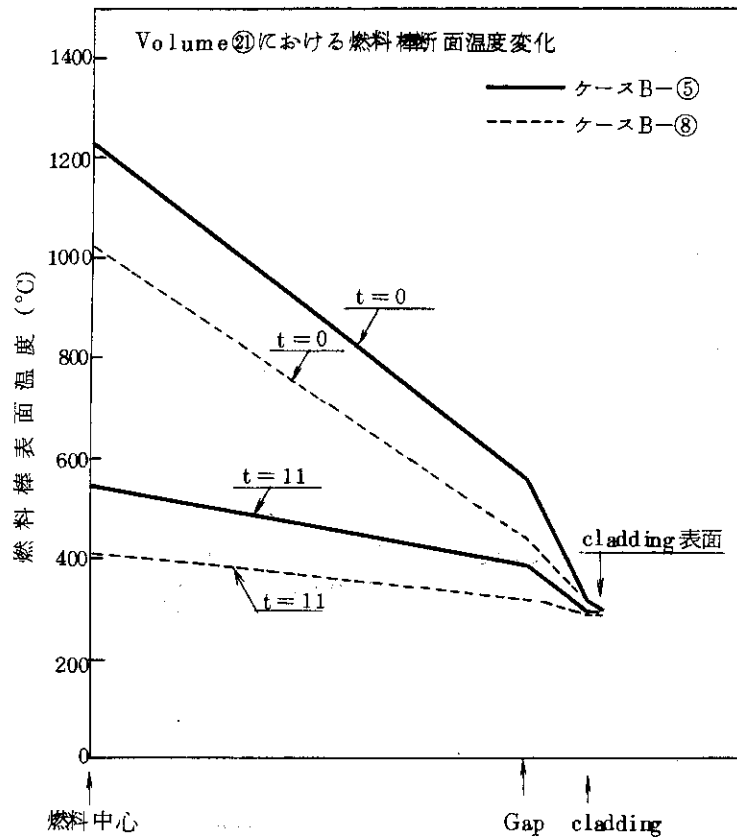


Fig. 47 ケースB-⑤, ⑧の vol.②における半径方向の燃料棒温度分布

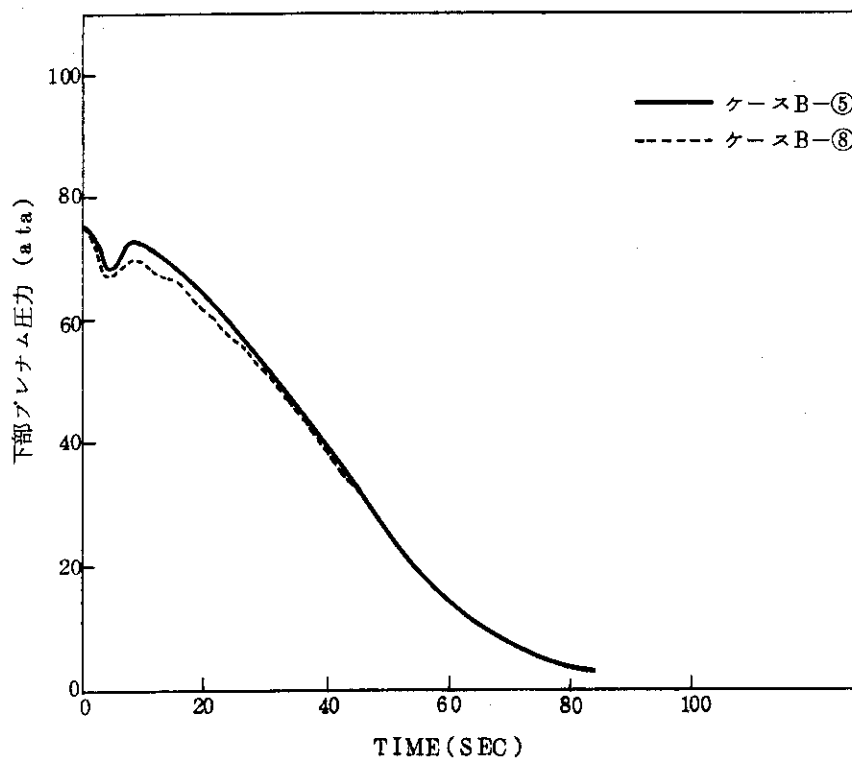


Fig. 48 ケース B-⑤, ⑧の下部プレナム圧力

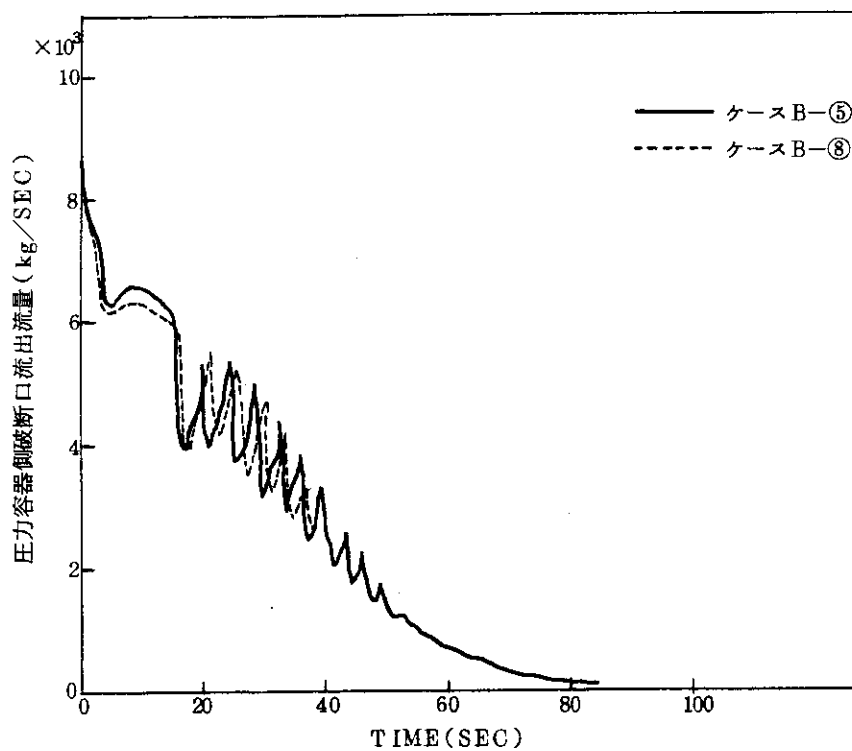


Fig. 49 ケース B-⑤, ⑧のPV側流出流量

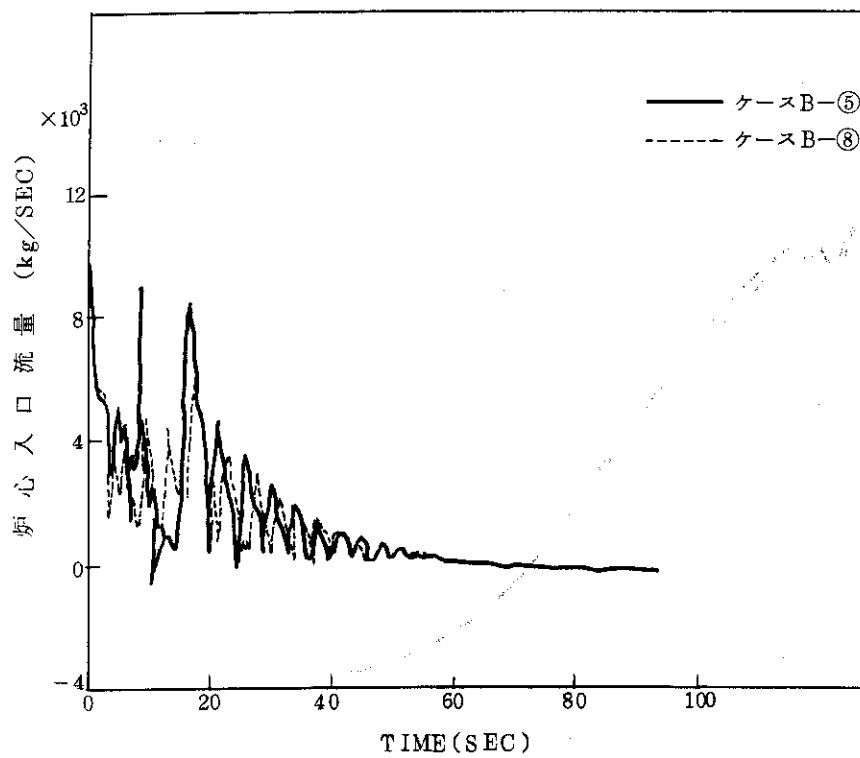


Fig. 50 ケースB-⑤, ⑧の炉心入口流量

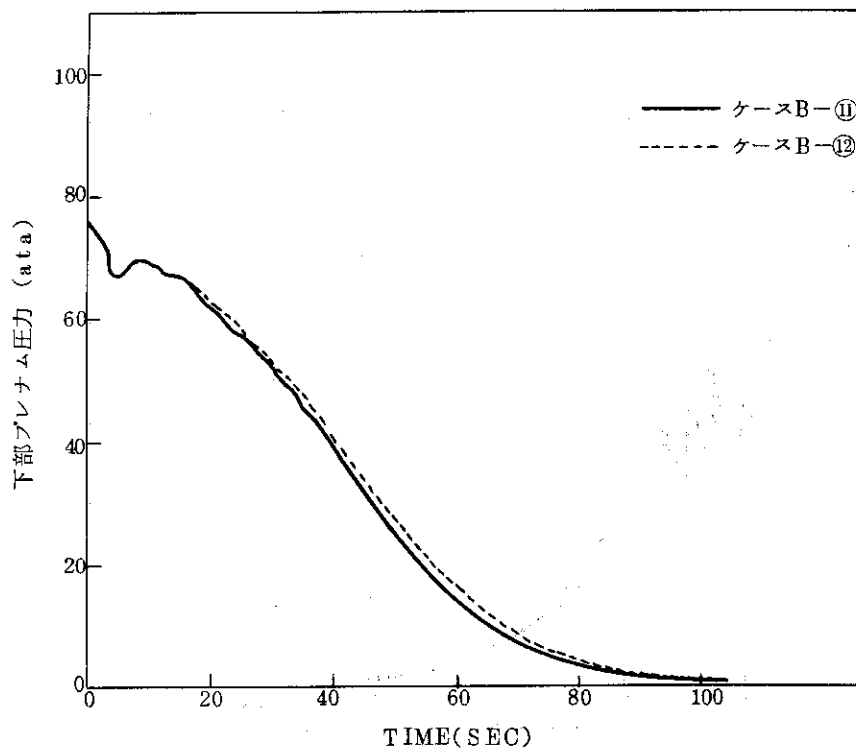


Fig. 51 ケースB-⑪, ⑫の下部プレナム圧力

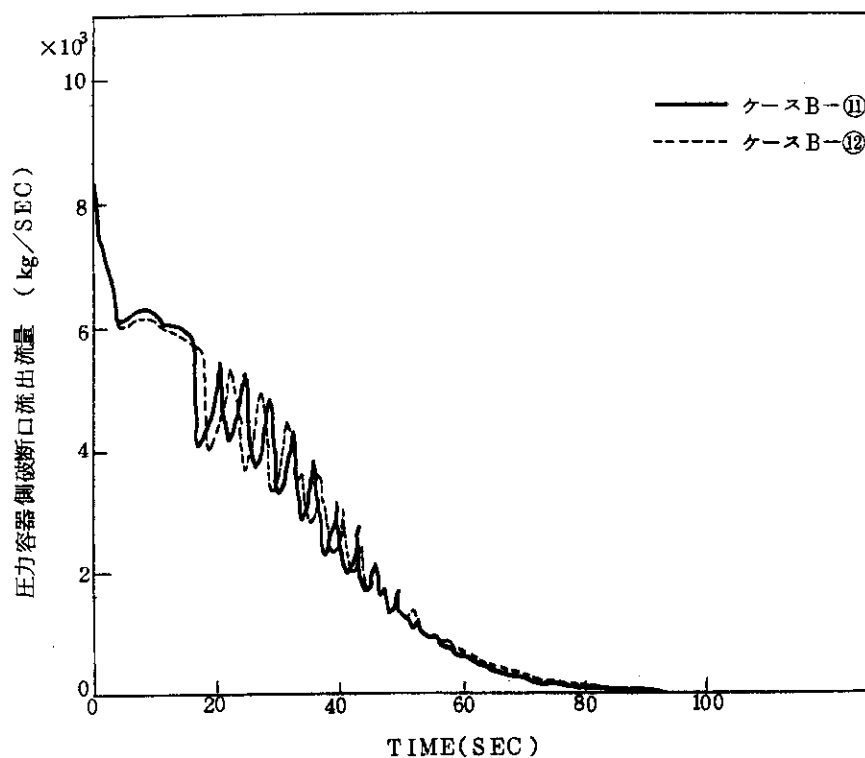


Fig. 52 ケースB-⑪, ⑫のPV側流出流量

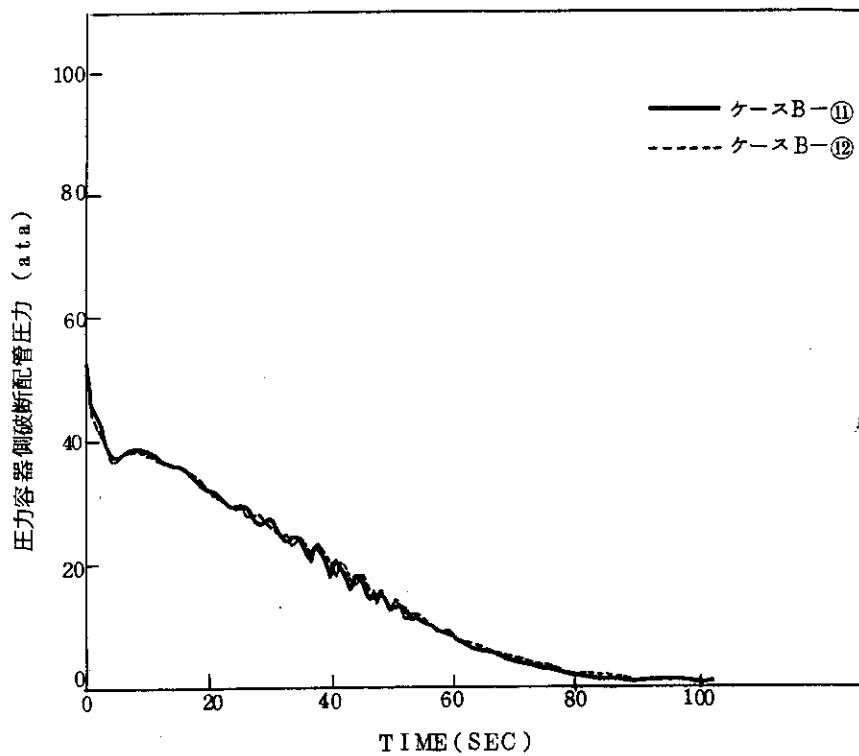


Fig. 53 ケースB-⑪, ⑫のPV側破断配管圧力

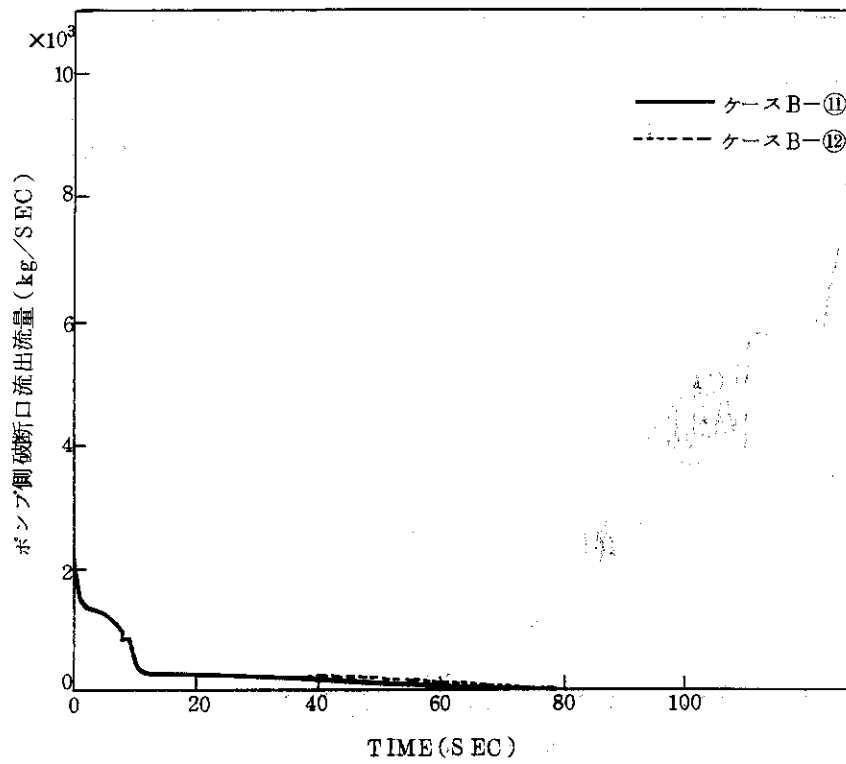


Fig. 54 ケース B-⑪, ⑫のポンプ側流出流量

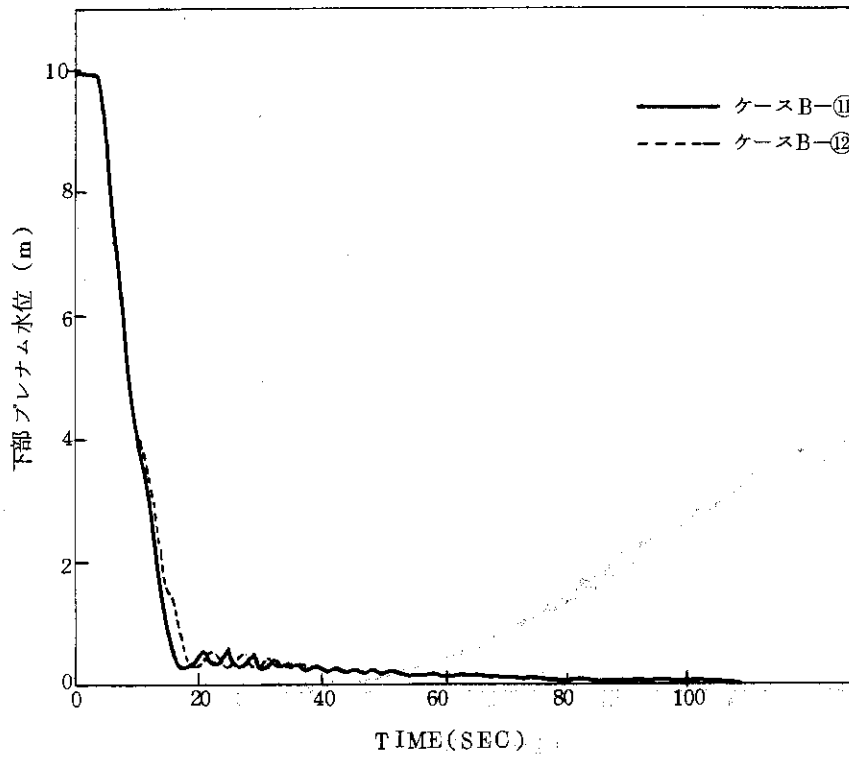


Fig. 55 ケース B-⑪, ⑫の下部ピトム水位

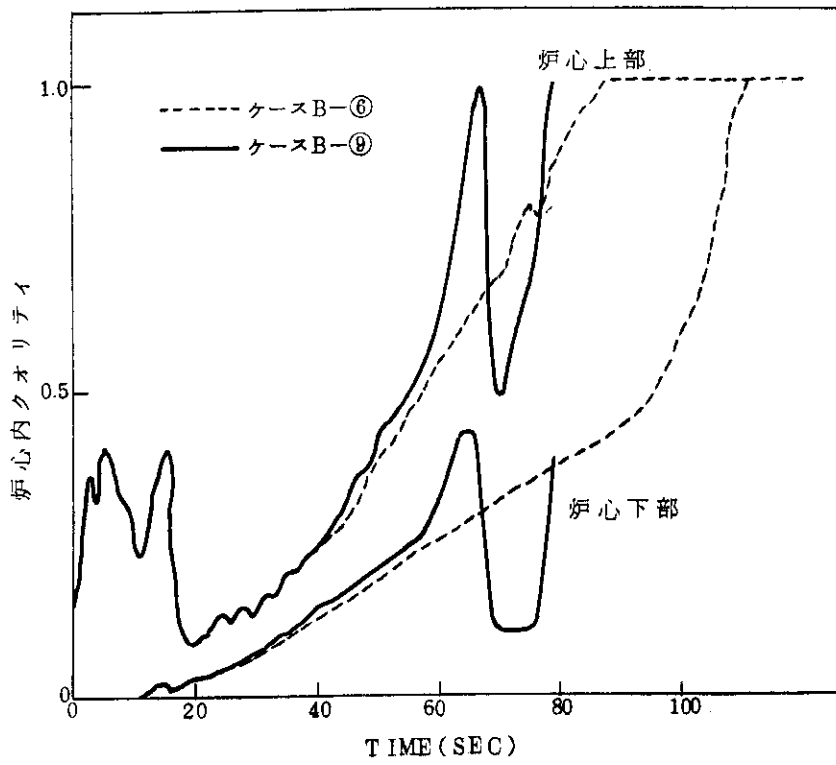


Fig. 56 ケースB-⑥, ⑨の炉心内クオリティの分布

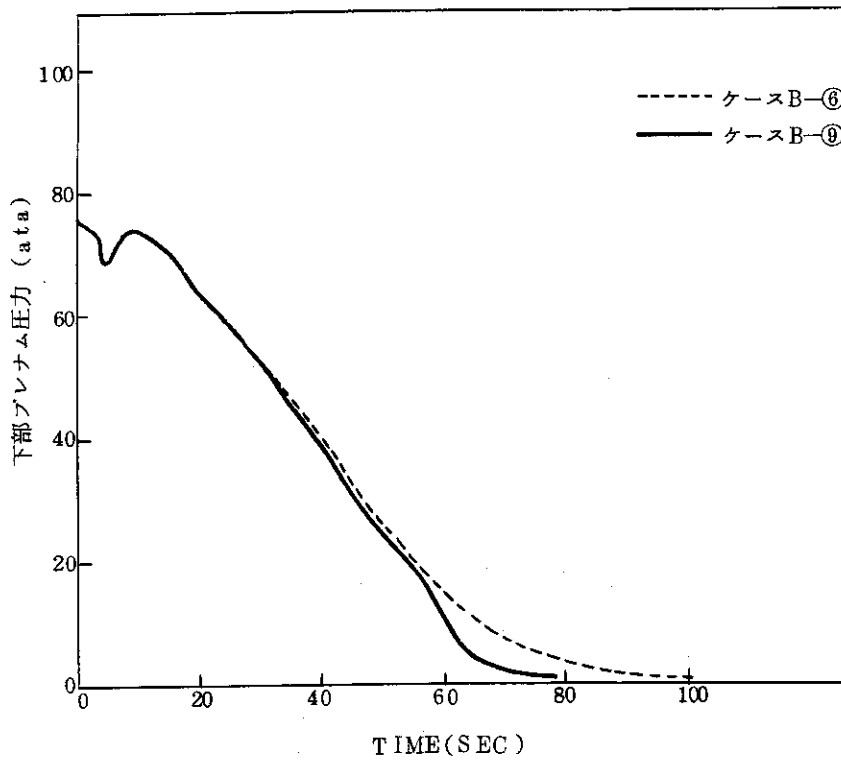


Fig. 57 ケースB-⑥, ⑨の下部プレナム圧力

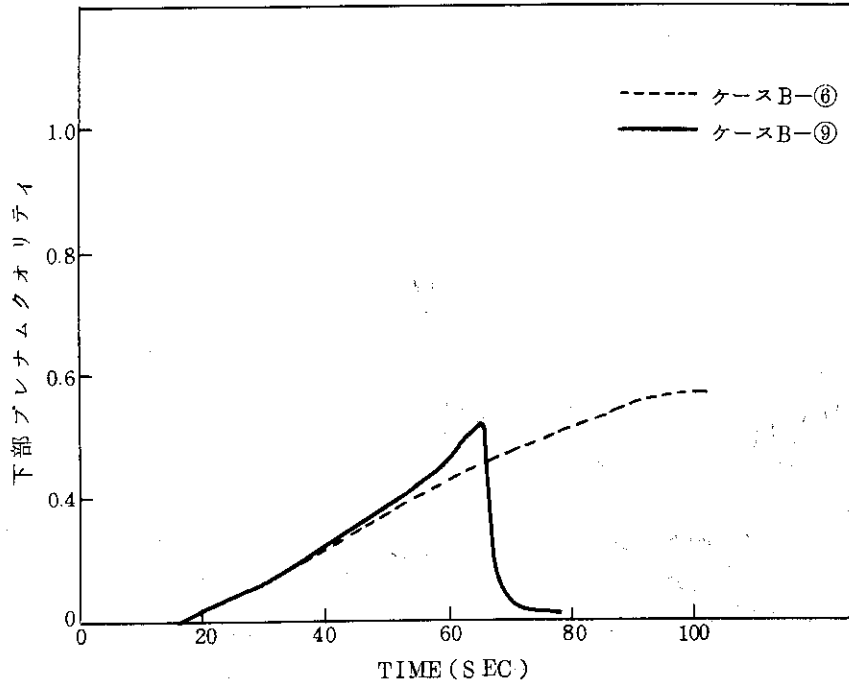


Fig. 58 ケース B-⑥, ⑨の下部プレナムクオリティ

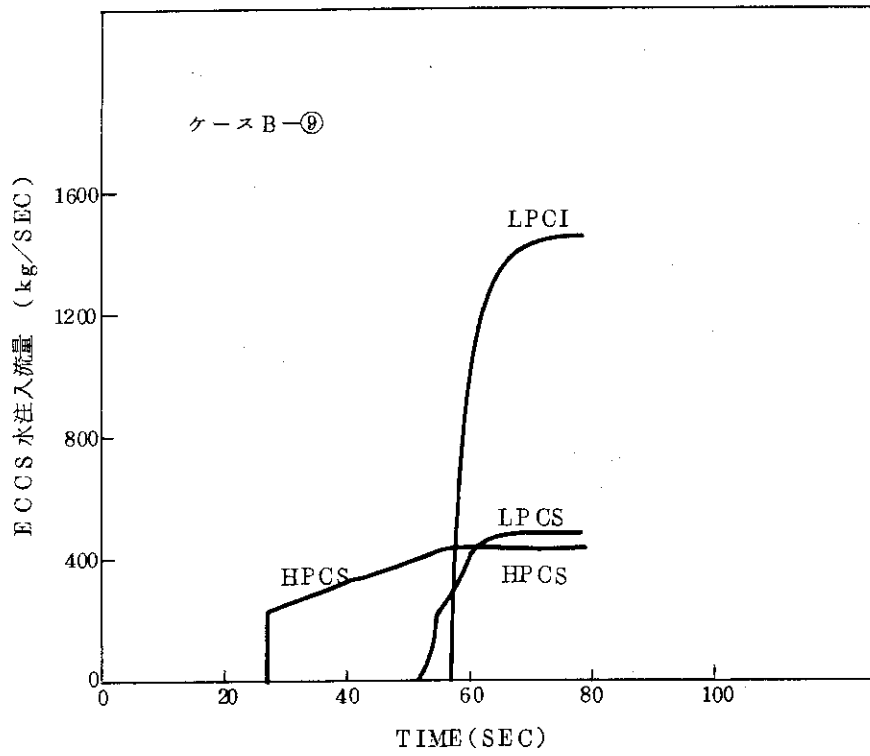


Fig. 59 ケース B-⑨の ECCS 水注入流量

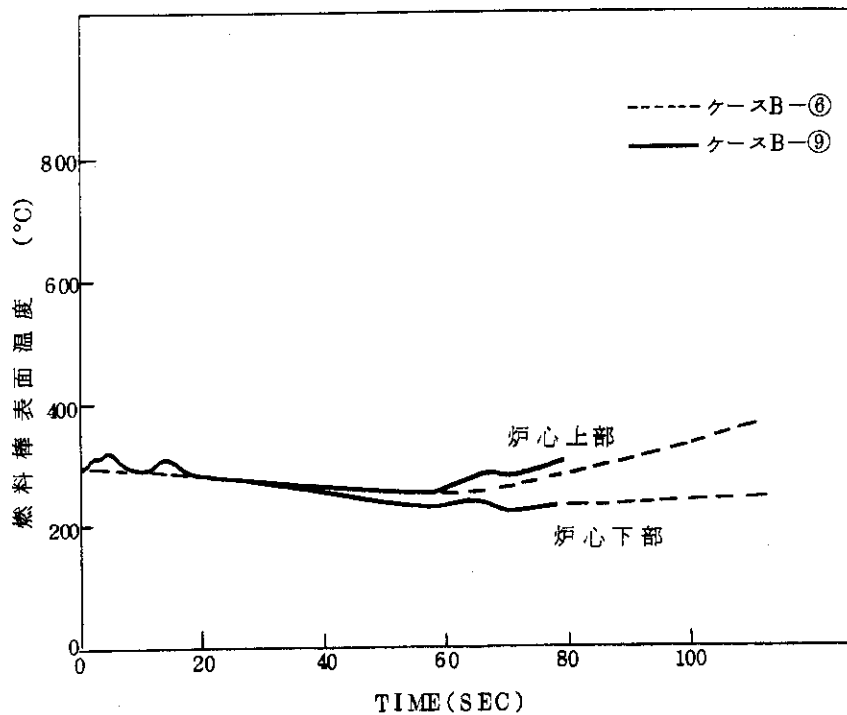


Fig. 60 ケースB-⑧, ⑨の炉心上・下部における燃料棒被ふく管表面温度

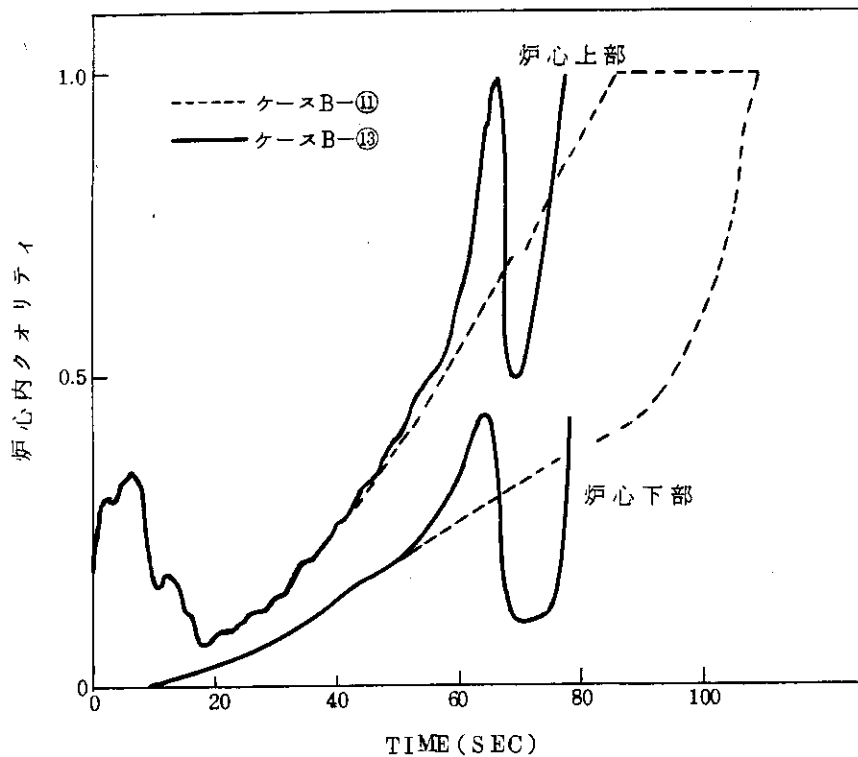


Fig. 61 ケースB-⑪, ⑬の炉心上・下部におけるクオリティ

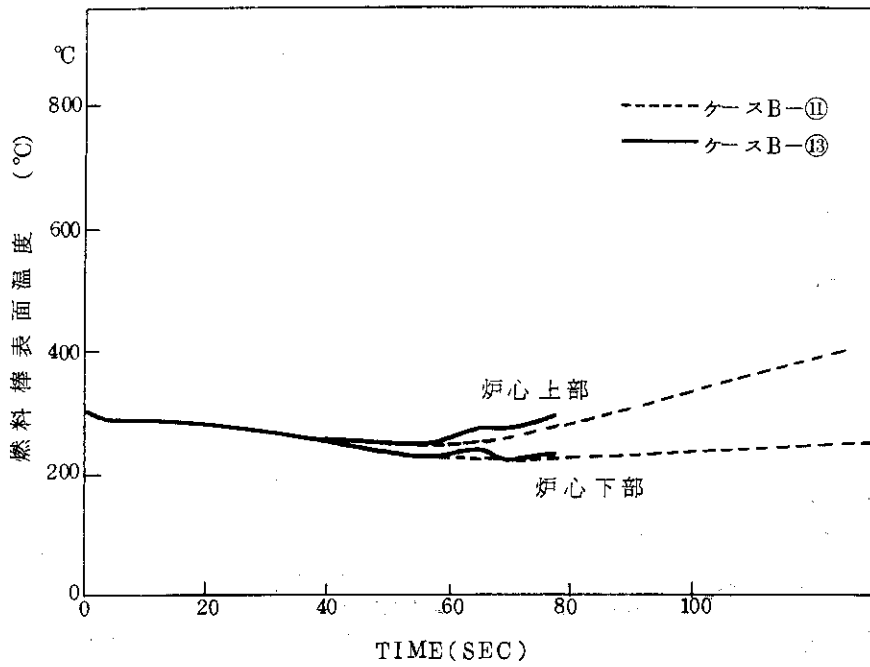


Fig. 62 ケース B-⑪, ⑬の炉心上・下部における燃料棒被ふく管表面温度

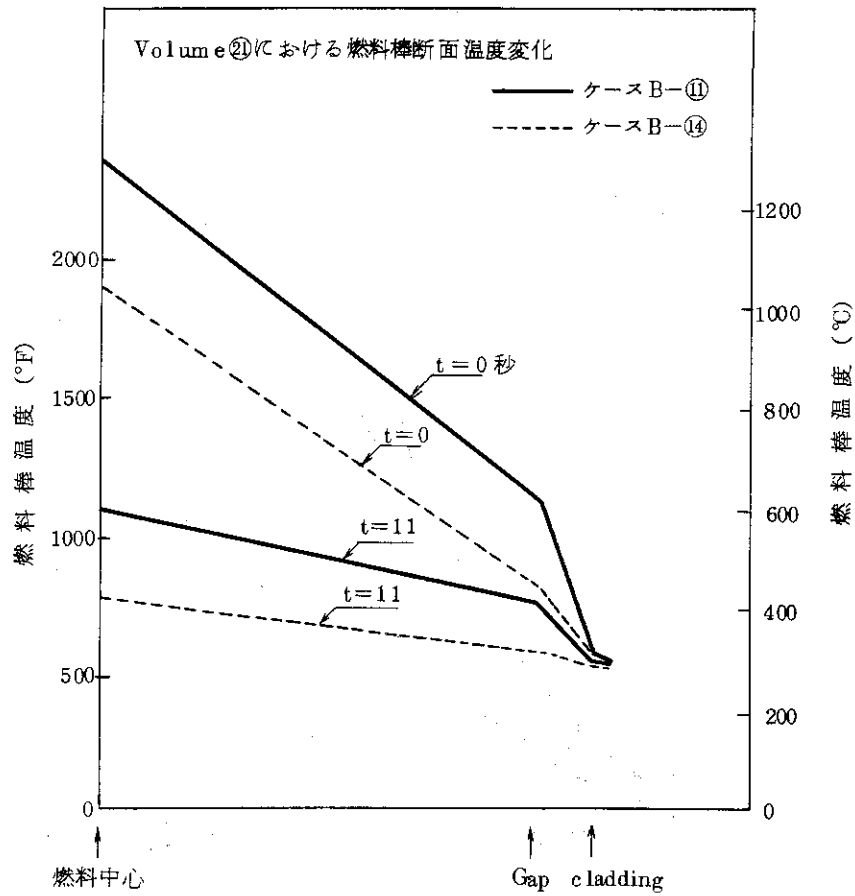


Fig. 63 ケース B-⑪, ⑭の vol. 21における半径方向の燃料棒温度分布

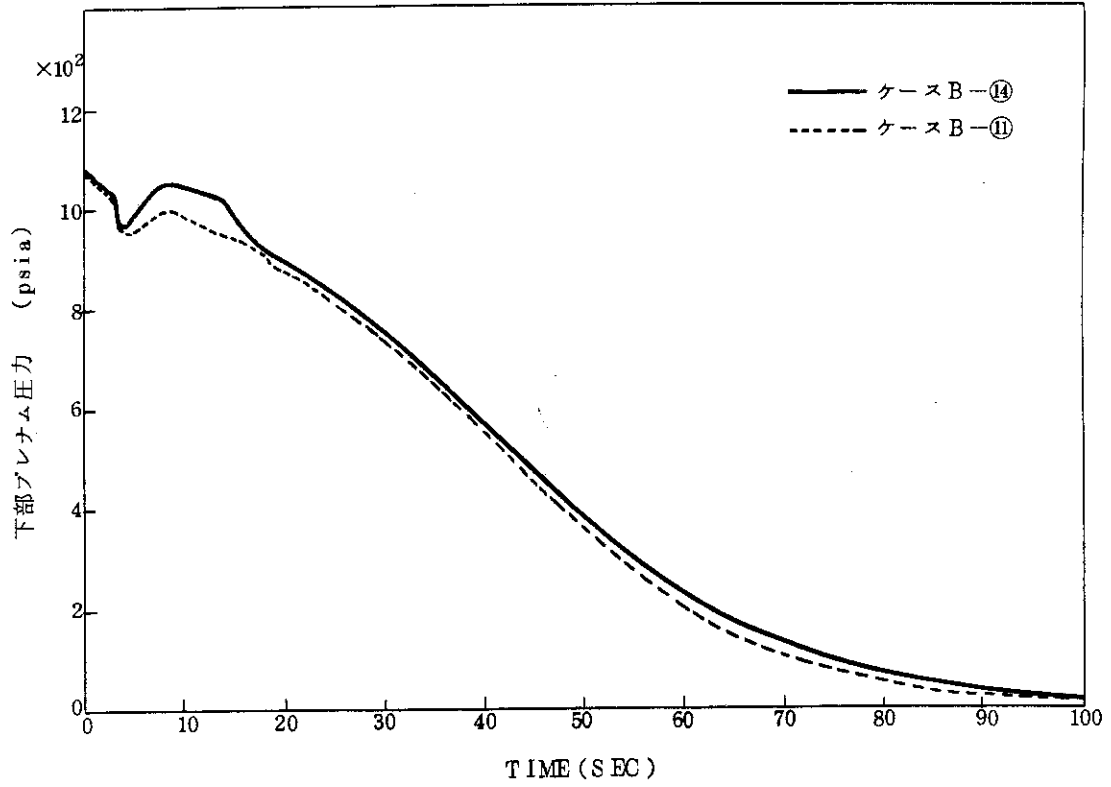


Fig. 64 ケース B-⑪, ⑭の下部ピトー管圧力

Appendix A ROSA III 実験と比較のための実炉の解析

計算ケースを Table A-1 に示す。特に ROSA III 実験との比較とことわった理由は、破断口レベルを、ROSA III 実験装置と同じにした条件で解析を行ったからである。

本解析の基本となったインプット値は、ケース B-⑩と同一である。このインプット値は確定したものではなく、まだ検討の余地が残されている。それゆえここでは、計算結果だけを示す。

A-1 再循環ポンプ吸込み側破断 (ケース BO-①②③④⑤)

計算ケースを Table A-1 に示す。破断面積は、本文の解析例 B-①~⑭と異っている。(本文の方は実際の値より約 1.3 倍大きい流路面積で計算している。)ここで用いた 2.46 ft^2 は、BWR/6 の再循環配管流路断面積に相当する。

ボリューム・ジャンクション構成図を Fig. A-1 に示す。破断口高さ以外は、Fig. 16 と同じである。

計算結果を Fig. A-1 ~ Fig. A-32 に示す。

Fig. A-2 にケース BO-①~BO-④の下部プレナム圧力の比較を示す。Fig. A-3 ~ Fig. A-9 にケース BO-①の主要な計算結果を示す。Fig. A-10 ~ Fig. A-14 にケース BO-②の主要な計算結果を示す。Fig. A-15 ~ Fig. A-19 にケース BO-③の主要な計算結果を示す。Fig. A-20 ~ Fig. A-24 にケース BO-④の主要な計算結果を示す。Fig. A-25, Fig. A-26 にケース BO-⑤, BO-①の下部プレナム圧力及びダウンコマ水位の比較を示す。Fig. A-27 ~ Fig. A-32 にケース BO-⑤の主要な計算結果を示す。

A-2 再循環ポンプ吐出側破断 (ケース BO-⑥⑦⑧)

計算ケースを Table A-1 に示す。破断口高さは、Fig. A-1 と同じである。

計算結果を Fig. A-33 ~ Fig. A-49 に示す。3 ケースの下部プレナム圧力、下部プレナム水位、両破断口流出流量の比較を Fig. A-33 ~ 36 に示す。

Fig. A-37 ~ Fig. A-40 にケース BO-⑥の主要な計算結果を、Fig. A-41 ~ Fig. A-45 にケース BO-⑦の主要な計算結果を、Fig. A-46 ~ Fig. A-49 にケース BO-⑧の主要な計算結果を示す。

A-3 主蒸気管破断 (ケース BO-⑨⑩⑪)

計算ケースを Table A-1 に示す。破断位置は、スチームドームにある主蒸気管ノズルと仮実する。破断口径は、Fig. A-51 に示す。最大破断口径は、主蒸気管流路面積と流量制限器

流路断面積とタービンバイパスの流路面積の和である。(Fig. B・19参照) 詳細な点については文献(7)を参照されたい。

計算結果を Fig. A・52~Fig. A・63 に示す。

図表リスト (Appendix A)

Table A-1 計算ケース一覧

Fig. A・1	BWRボリューム・ジャンクション構成
Fig. A・2	ケースBO-①~④の下部プレナム圧力
Fig. A・3	ケースBO-①のダウンカマ水位
Fig. A・4	ケースBO-①のPV側流出流量とクオリティー
Fig. A・5	ケースBO-①のポンプ側流出流量とクオリティー
Fig. A・6	ケースBO-①の炉心入口流量
Fig. A・7	ケースBO-①の炉心出口流量
Fig. A・8	ケースBO-①の燃料棒被ふく管表面温度
Fig. A・9	ケースBO-①の炉心内クオリティー
Fig. A・10	ケースBO-②のECCS水注入流量
Fig. A・11	ケースBO-②の炉心入口流量
Fig. A・12	ケースBO-②の炉心出口流量
Fig. A・13	ケースBO-②の炉心内クオリティー
Fig. A・14	ケースBO-②の燃料棒被ふく管表面温度
Fig. A・15	ケースBO-③のECCS水注入流量
Fig. A・16	ケースBO-③の炉心入口流量
Fig. A・17	ケースBO-③の炉心出口流量
Fig. A・18	ケースBO-③の炉心内クオリティー
Fig. A・19	ケースBO-③の燃料棒被ふく管表面温度
Fig. A・20	ケースBO-④の炉心入口流量
Fig. A・21	ケースBO-④の炉心出口流量
Fig. A・22	ケースBO-④の炉心内クオリティー
Fig. A・23	ケースBO-④の燃料棒被ふく管表面温度
Fig. A・24	ケースBO-④のECCS水注入流量
Fig. A・25	ケースBO-①と⑤の下部プレナム圧力
Fig. A・26	ケースBO-①と⑤のダウンカマ水位
Fig. A・27	ケースBO-⑤のPV側流出流量とクオリティー
Fig. A・28	ケースBO-⑤のポンプ側流出流量とクオリティー
Fig. A・29	ケースBO-⑤の炉心入口流量
Fig. A・30	ケースBO-⑤の炉心出口流量
Fig. A・31	ケースBO-⑤の炉心内クオリティー
Fig. A・32	ケースBO-⑤の燃料棒被ふく管表面温度

- Fig. A・33 ケースBO-⑥～⑧の下部プレナム圧力
 Fig. A・34 ケースBO-⑥～⑧の下部プレナム水位
 Fig. A・35 ケースBO-⑥～⑧のポンプ側流出流量
 Fig. A・36 ケースBO-⑥～⑧のジェットポンプ側流出流量
 Fig. A・37 ケースBO-⑥の燃料棒被ふく管表面温度
 Fig. A・38 ケースBO-⑥の炉心内クオリティー
 Fig. A・39 ケースBO-⑥の炉心入口流量
 Fig. A・40 ケースBO-⑥の炉心出口流量
 Fig. A・41 ケースBO-⑦のECCS水注入流量
 Fig. A・42 ケースBO-⑦の炉心入口流量
 Fig. A・43 ケースBO-⑦の炉心出口流量
 Fig. A・44 ケースBO-⑦の燃料棒被ふく管表面温度
 Fig. A・45 ケースBO-⑦の炉心内クオリティー
 Fig. A・46 ケースBO-⑧の炉心入口流量
 Fig. A・47 ケースBO-⑧の炉心出口流量
 Fig. A・48 ケースBO-⑧の炉心内クオリティー
 Fig. A・49 ケースBO-⑧の燃料棒被ふく管表面温度
 Fig. A・50 給水流量と主蒸気管流量の変化
 Fig. A・51 ケースBO-⑨～⑪の主蒸気管流路面積
 Fig. A・52 ケースBO-⑨～⑪の下部プレナム圧力
 Fig. A・53 ケースBO-⑨～⑪の流出流量
 Fig. A・54 ケースBO-⑨～⑪の破断口クオリティー
 Fig. A・55 ケースBO-⑨～⑪のダウンコマ水位
 Fig. A・56 ケースBO-⑨～⑪の炉心入口流量
 Fig. A・57 ケースBO-⑨～⑪の炉心出口流量
 Fig. A・58 ケースBO-⑨の炉心内クオリティー
 Fig. A・59 ケースBO-⑩の炉心内クオリティー
 Fig. A・60 ケースBO-⑪の炉心内クオリティー
 Fig. A・61 ケースBO-⑨の燃料棒被ふく管表面温度
 Fig. A・62 ケースBO-⑩の燃料棒被ふく管表面温度
 Fig. A・63 ケースBO-⑪の燃料棒被ふく管表面温度

Table A-1 計算ケース一覧

ケース	破断位置	破断面積	ECCS	その他の
BO-①	ポンプ吸込側	2.46 ft ²	なし	
BO-②	ポンプ吸込側	2.46 ft ²	ALL ECCS	
BO-③	ポンプ吸込側	2.46 ft ²	LPCS+3LPCI	
BO-④	ポンプ吸込側	2.46 ft ²	HPCS+2LPCI	
BO-⑤	ポンプ吸込側	4.338×10 ⁻¹ ft ²	なし	
BO-⑥	ポンプ吐出側	2.46 ft ²	なし	破断後の給水流量は, Fig.A.50に示す 破断後の主蒸気管流量は, Fig.A.50に示す
BO-⑦	ポンプ吐出側	2.46 ft ²	HPCS+2LPCI	破断後の給水流量は, Fig.A.50に示す 破断後の主蒸気管流量は, Fig.A.50に示す
BO-⑧	ポンプ吐出側	2.46 ft ²	なし	
BO-⑨	主蒸気管	Fig.A.51	なし	破断後の給水流量は, Fig.A.50に示す
BO-⑩	主蒸気管	Fig.A.51	なし	破断後の給水流量は, Fig.A.50に示す
BO-⑪	主蒸気管	Fig.A.51	なし	破断後の給水流量は, Fig.A.50に示す

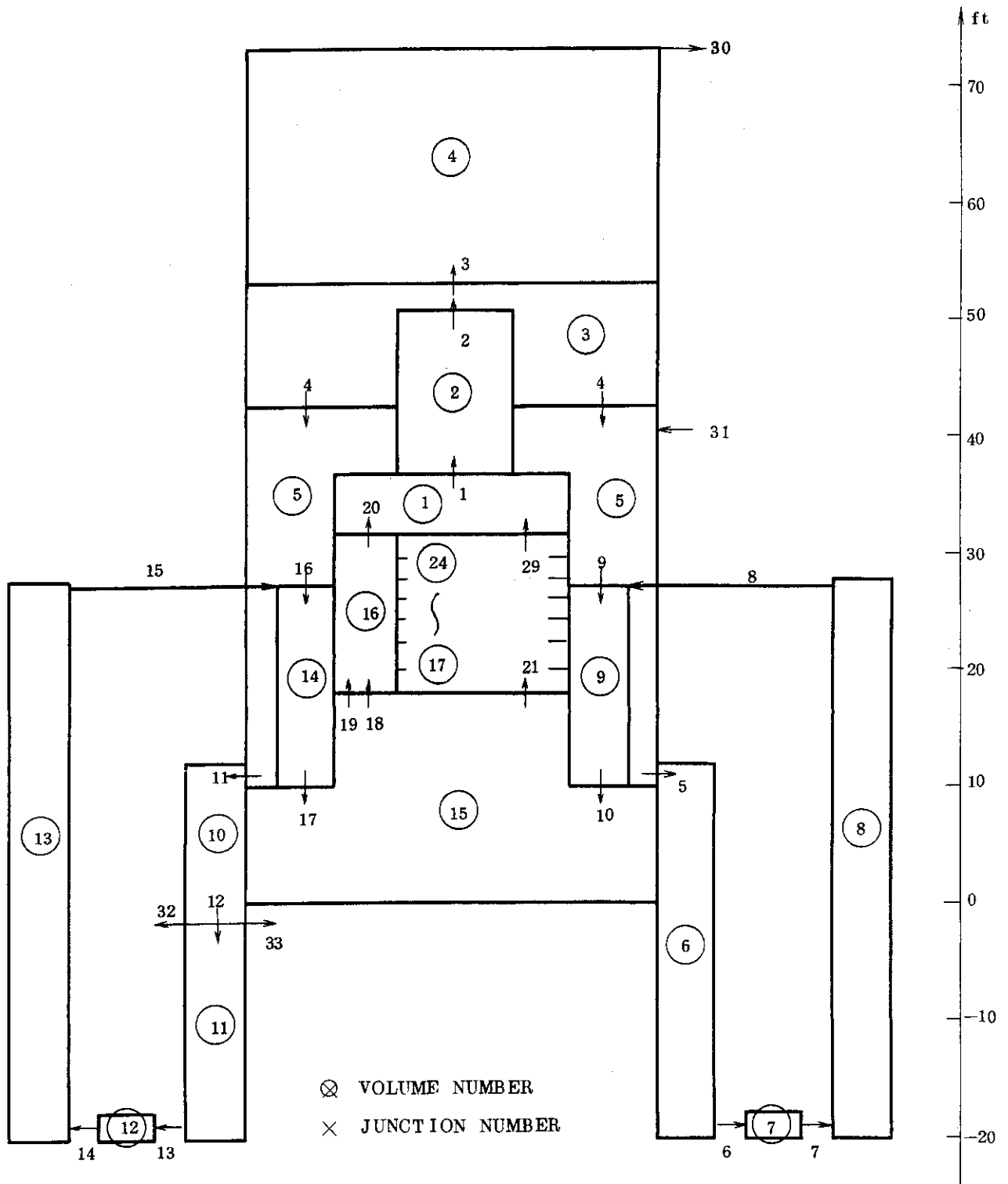


Fig. A·1 BWRボリューム・ジャンクション構成

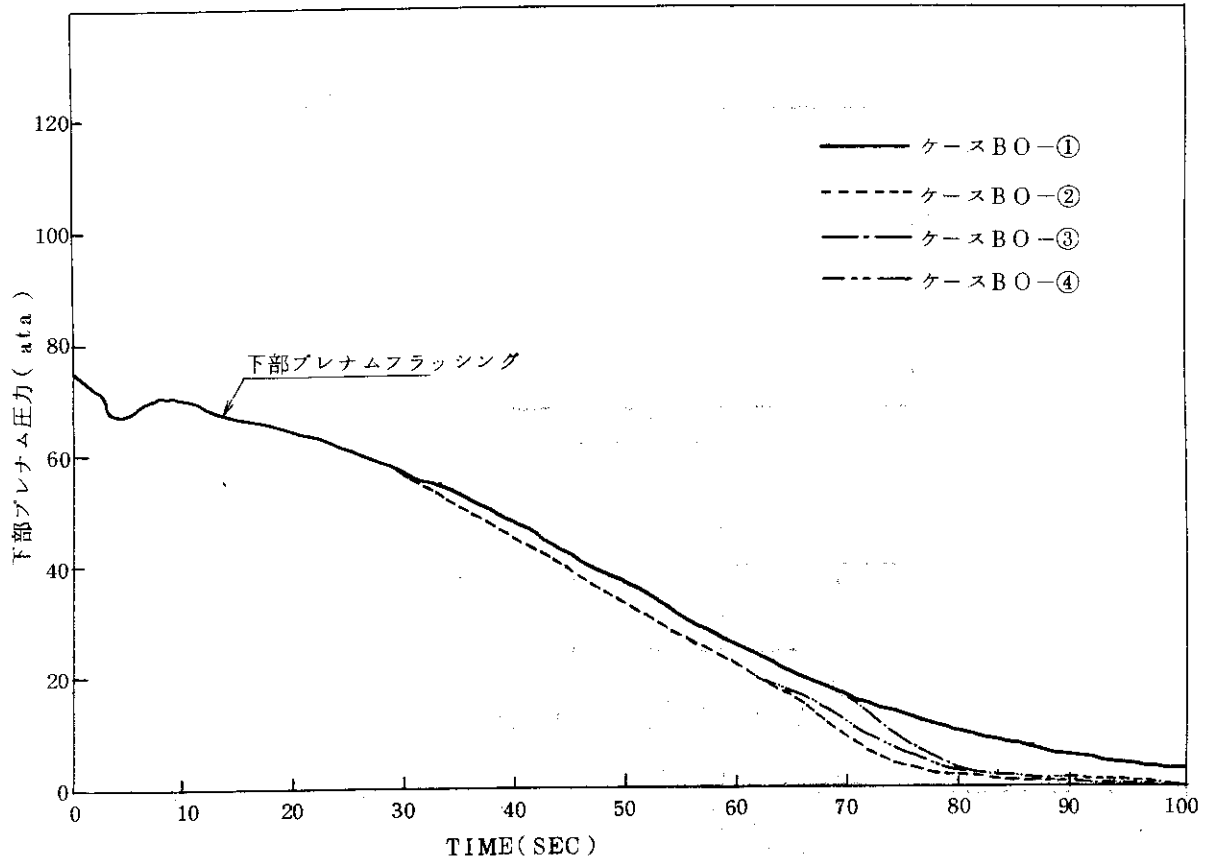


Fig. A. 2 ケースBO-①~④の下部プレナム圧力

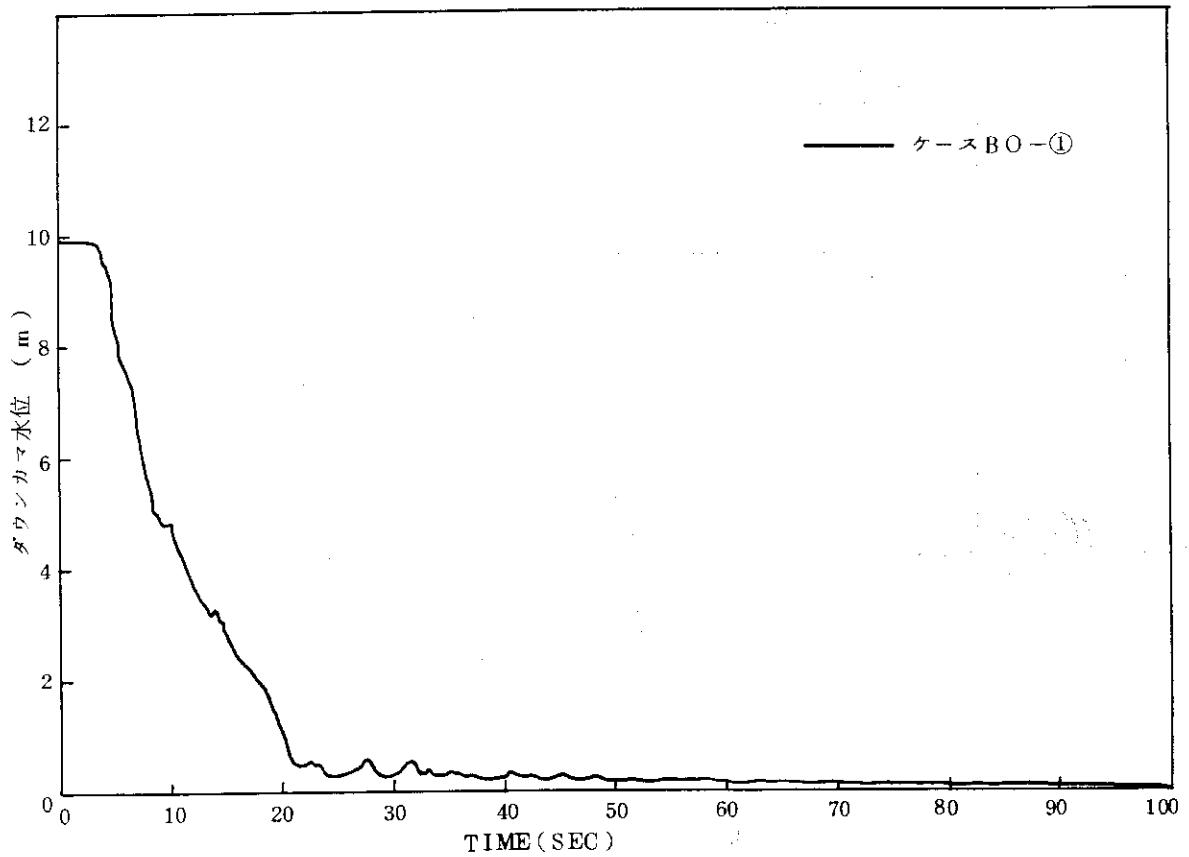


Fig. A. 3 ケースBO-①のダウンカマ水位

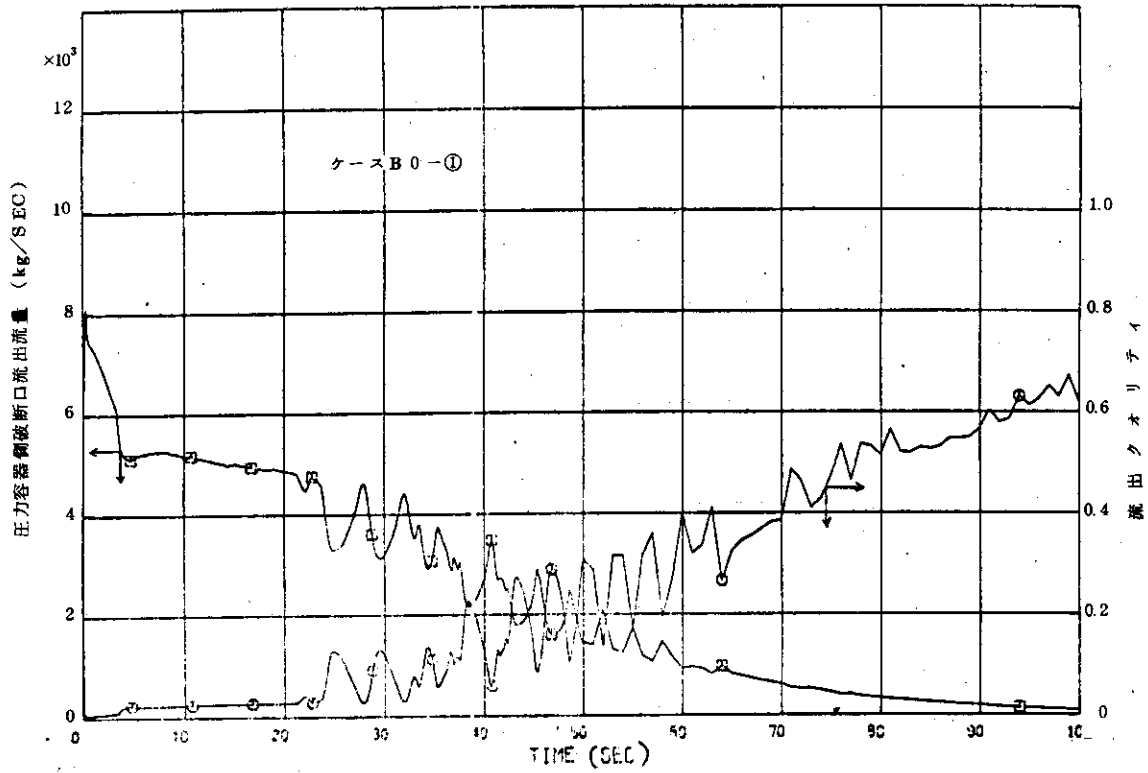


Fig. A.4 ケース B0-1 の PV 側流出流量とクオリティ

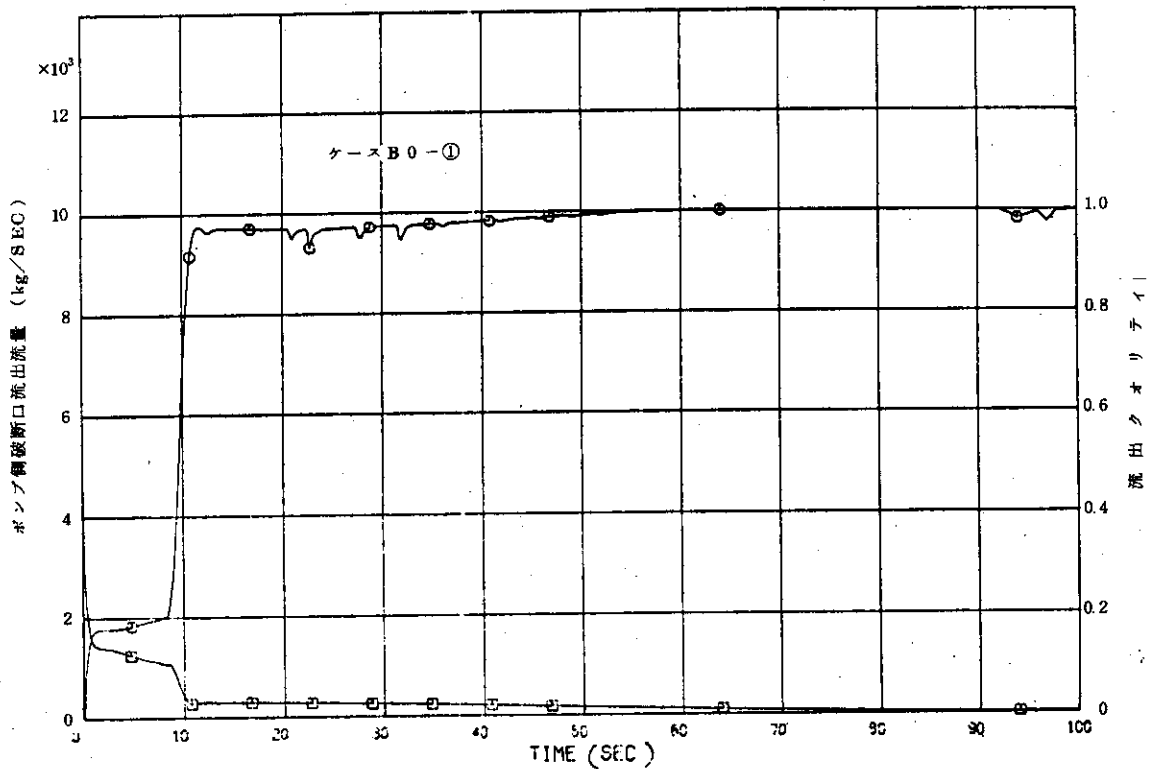


Fig. A.5 ケース B0-1 のポンプ側流出流量とクオリティ

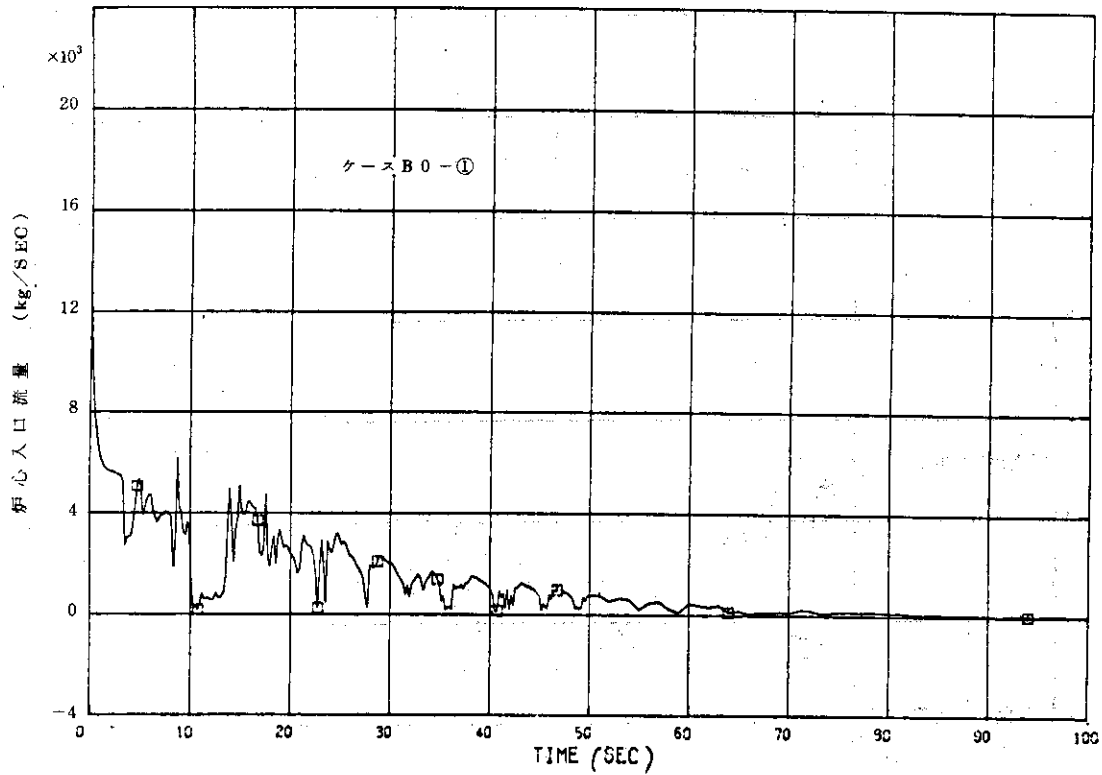


Fig. A.6 ケース B0-①の炉心入口流量

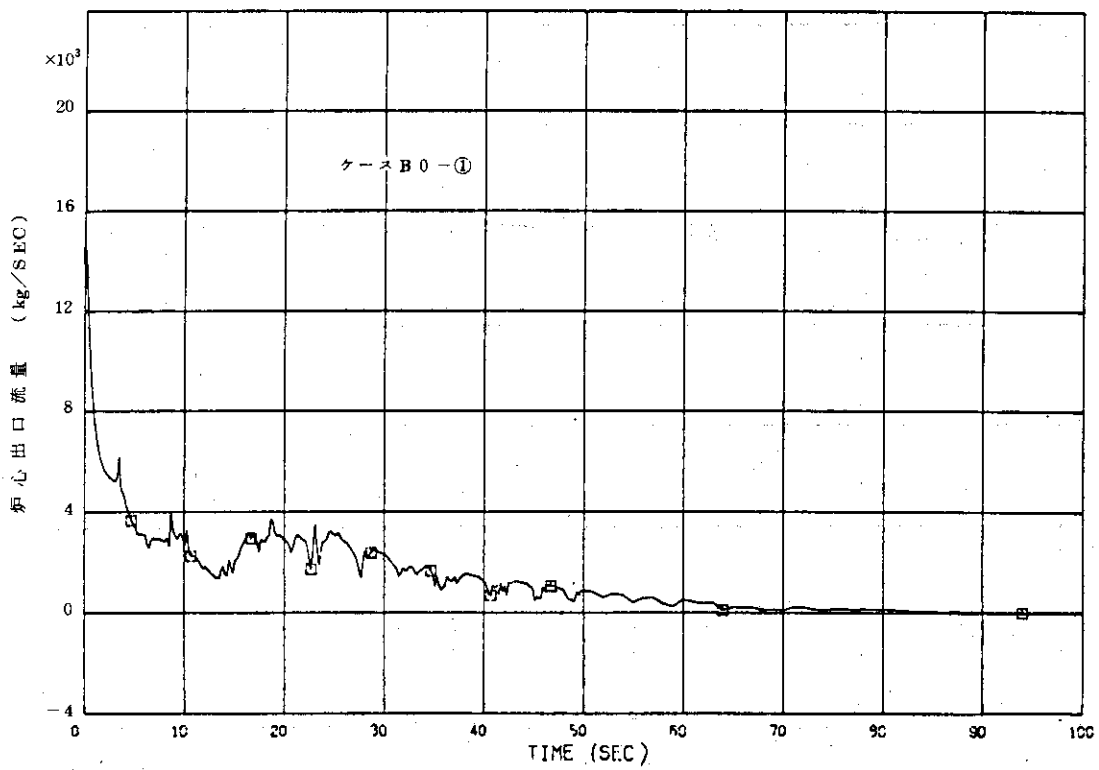


Fig. A.7 ケース B0-①の炉心出口流量

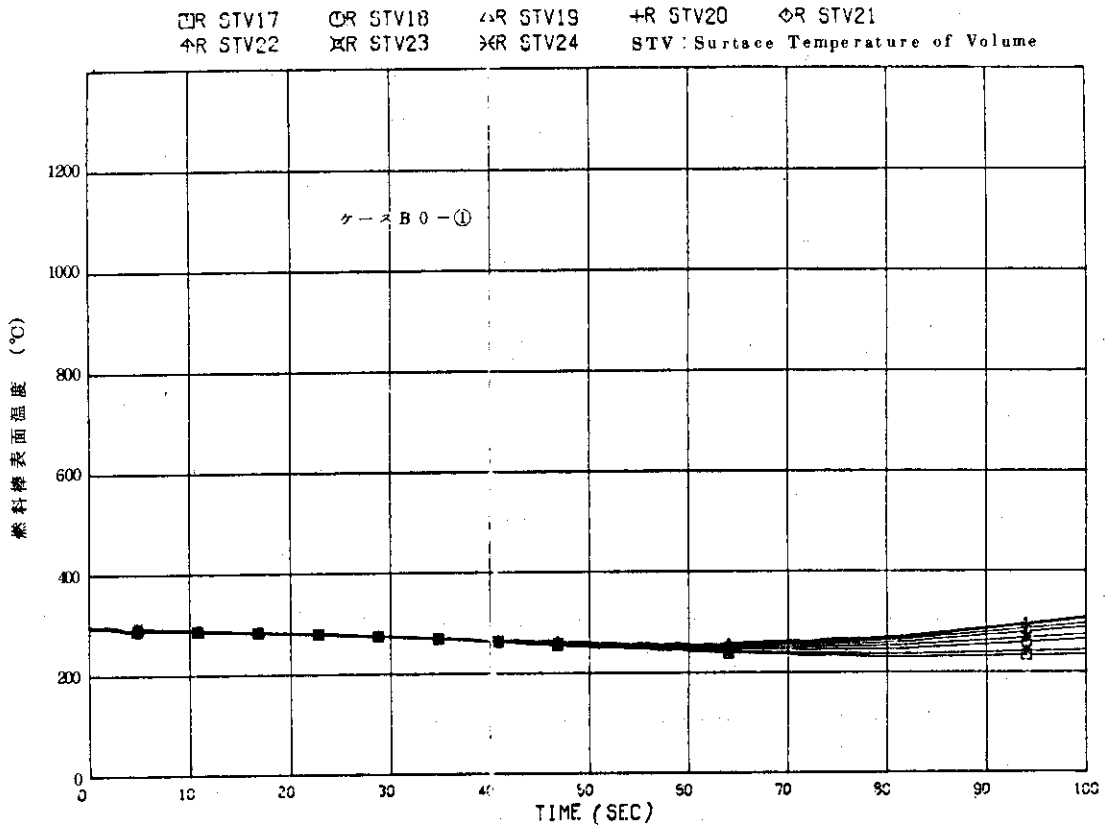


Fig. A. 8 ケース B 0 - ① の燃料棒被ふく管表面温度

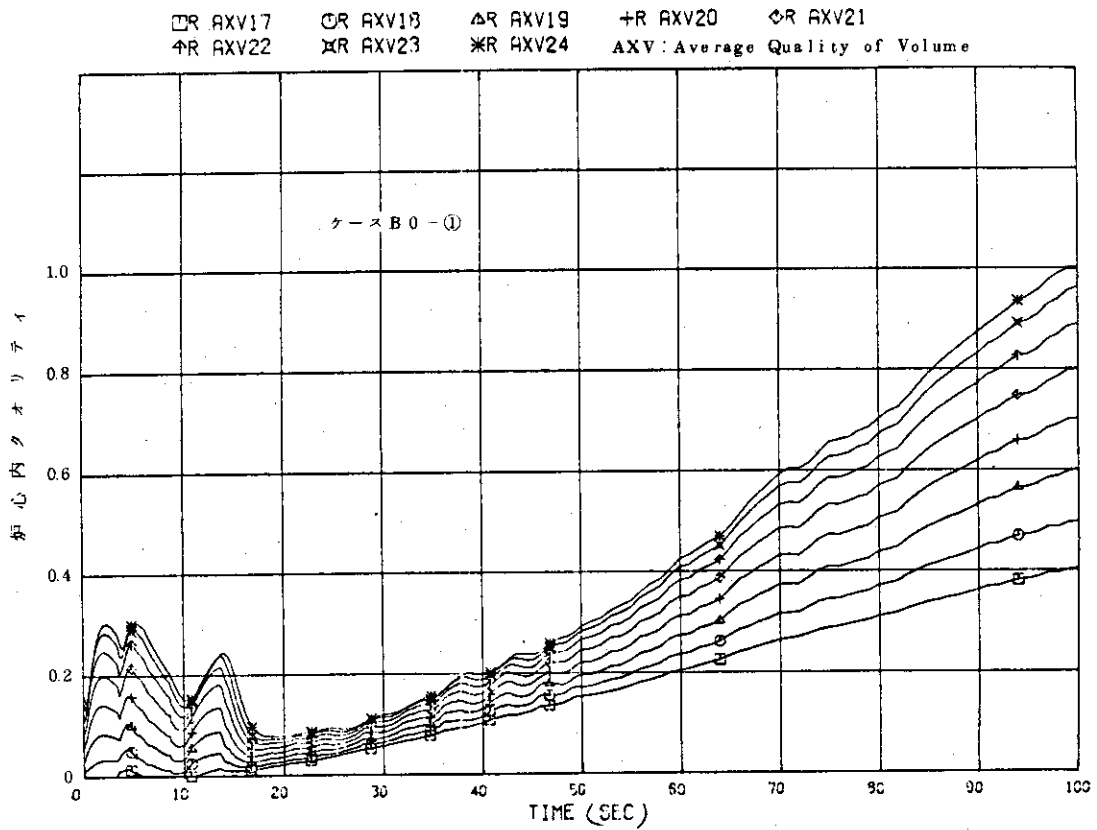


Fig. A. 9 ケース B 0 - ① の炉心内クオリティ

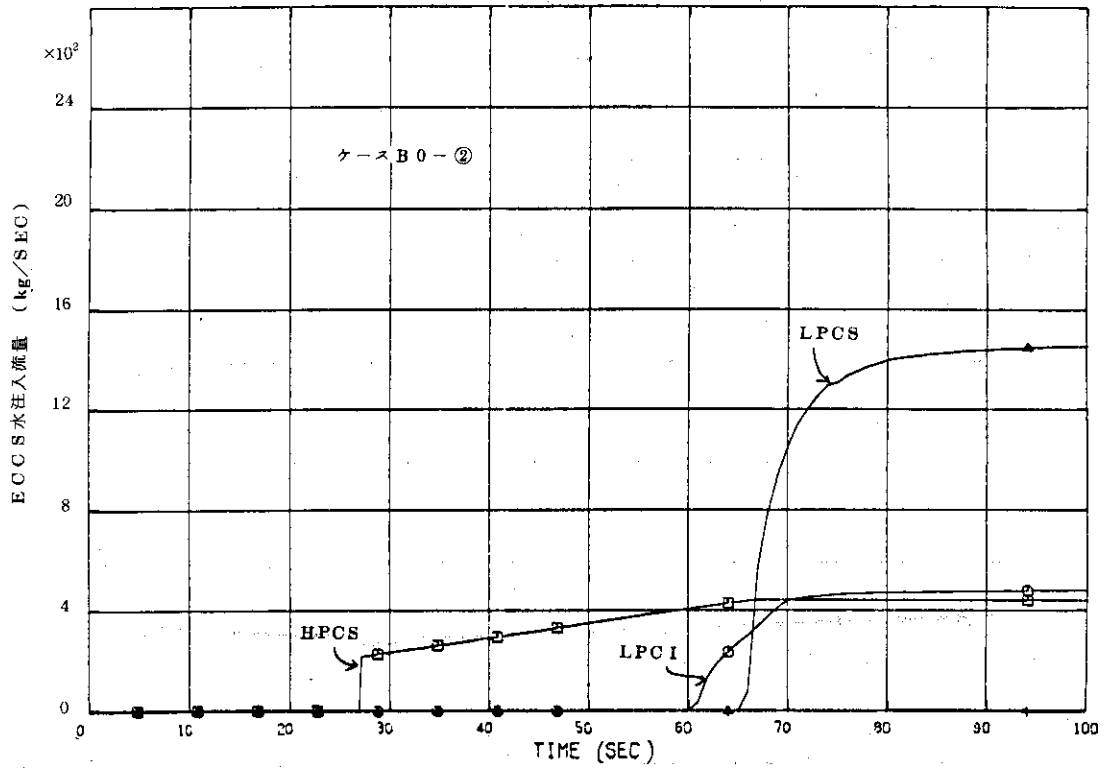


Fig. A.10 ケースB0-②のECCS水注入流量

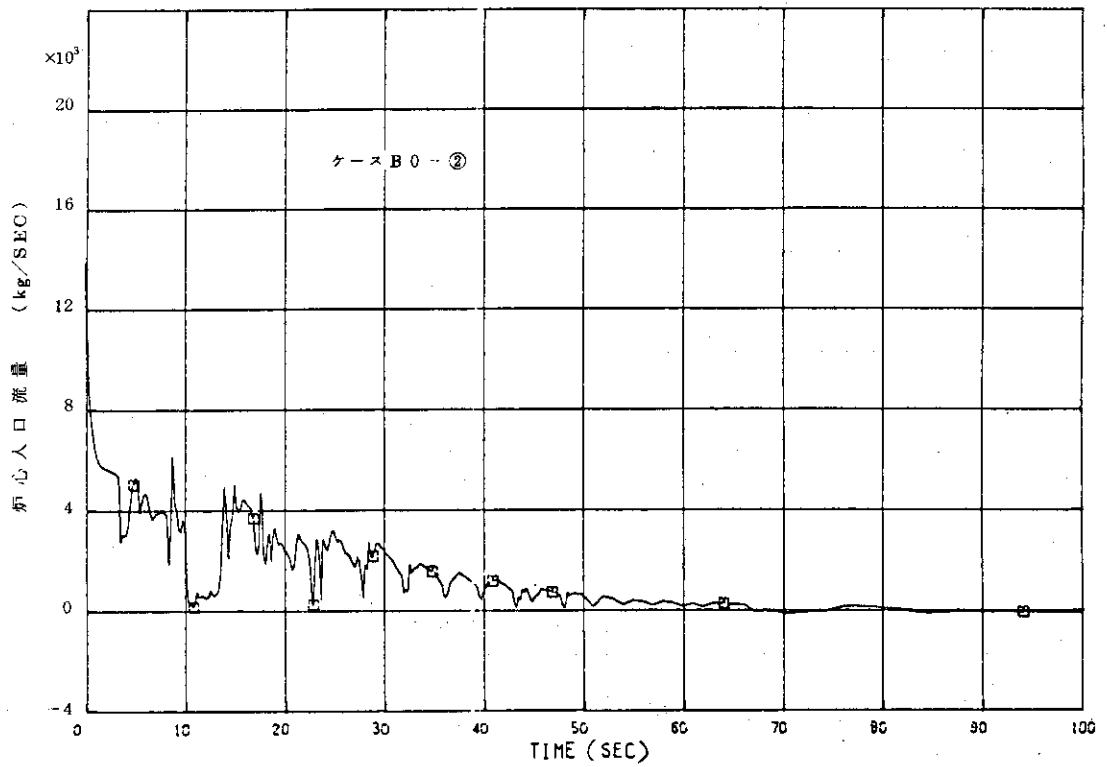


Fig. A.11 ケースB0-②の炉心入口流量

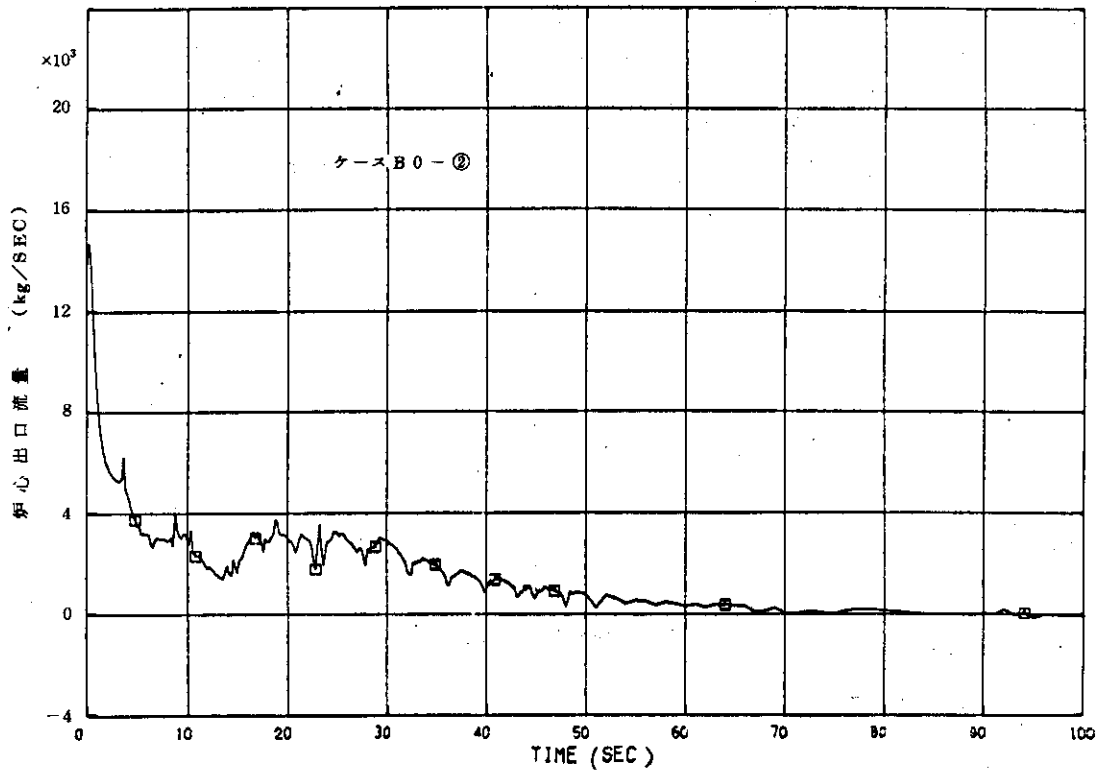


Fig. A.12 ケース B0-2 の炉心出口流量

□R AXV17 ○R AXV18 △R AXV19 +R AXV20 ◇R AXV21
 †R AXV22 ×R AXV23 ※R AXV24 AXV: Average Quality of Volume

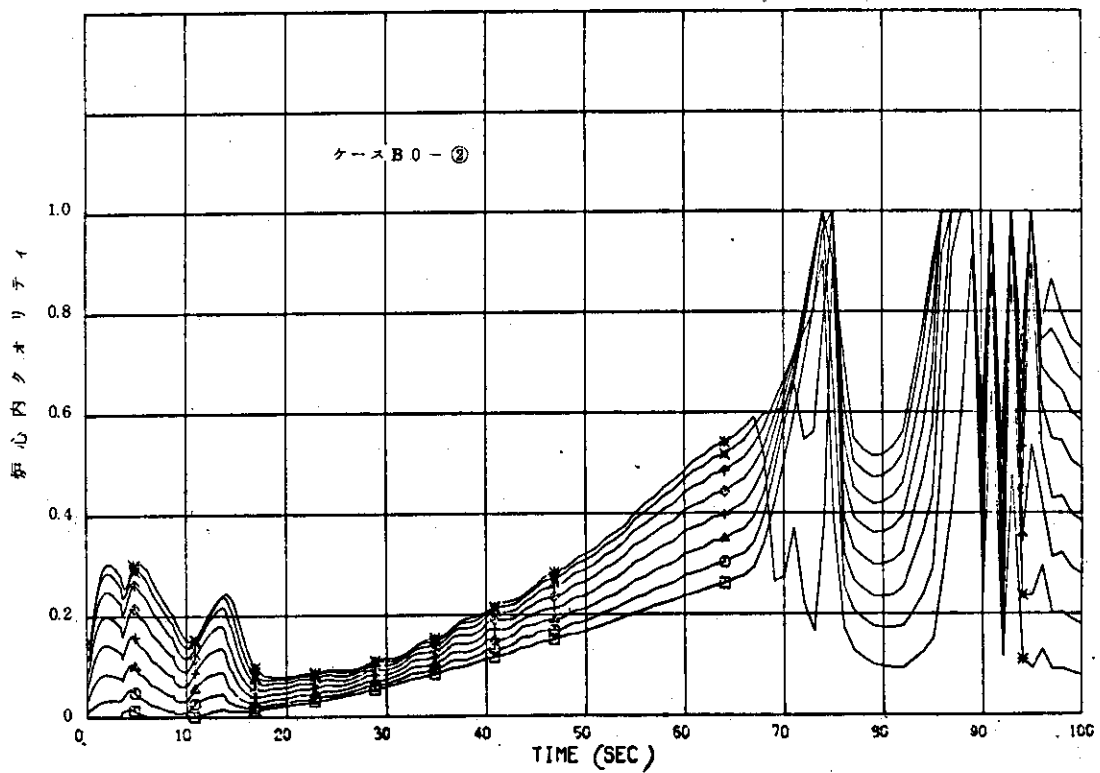


Fig. A.13 ケース B0-2 の炉心内クオリティ

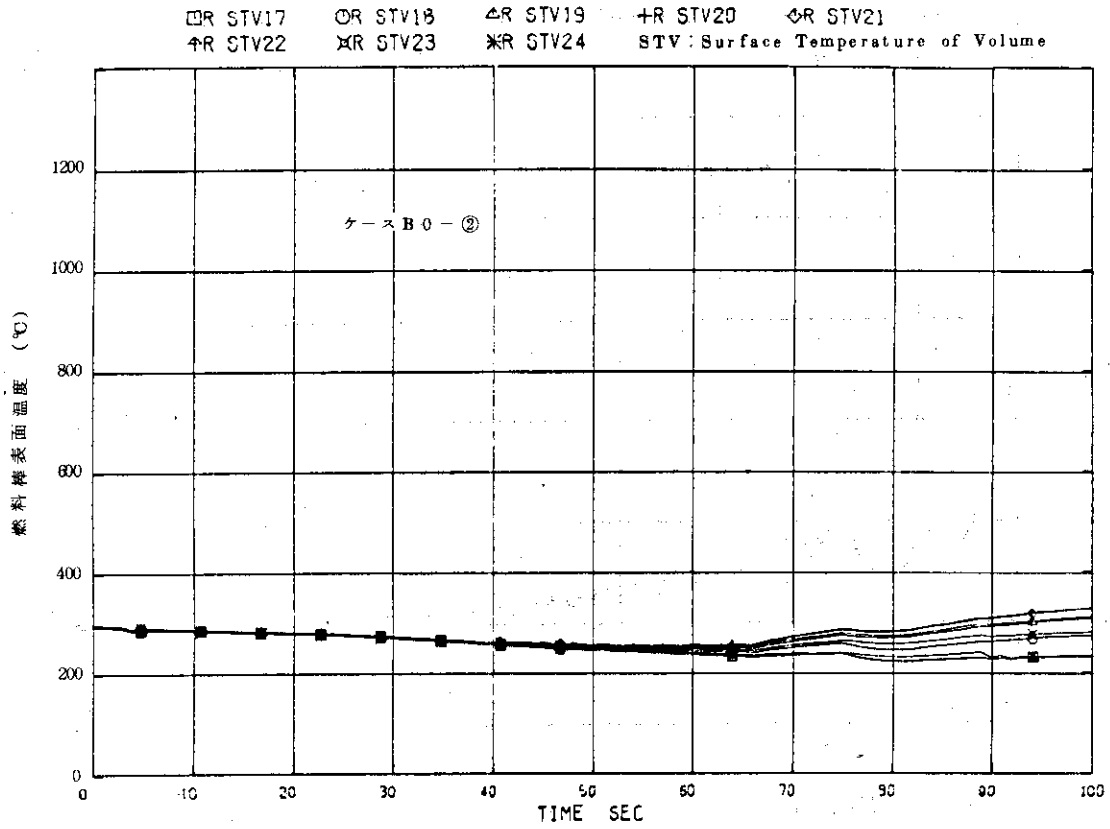


Fig. A.14 ケース B0-②の燃料棒被ふく管表面温度

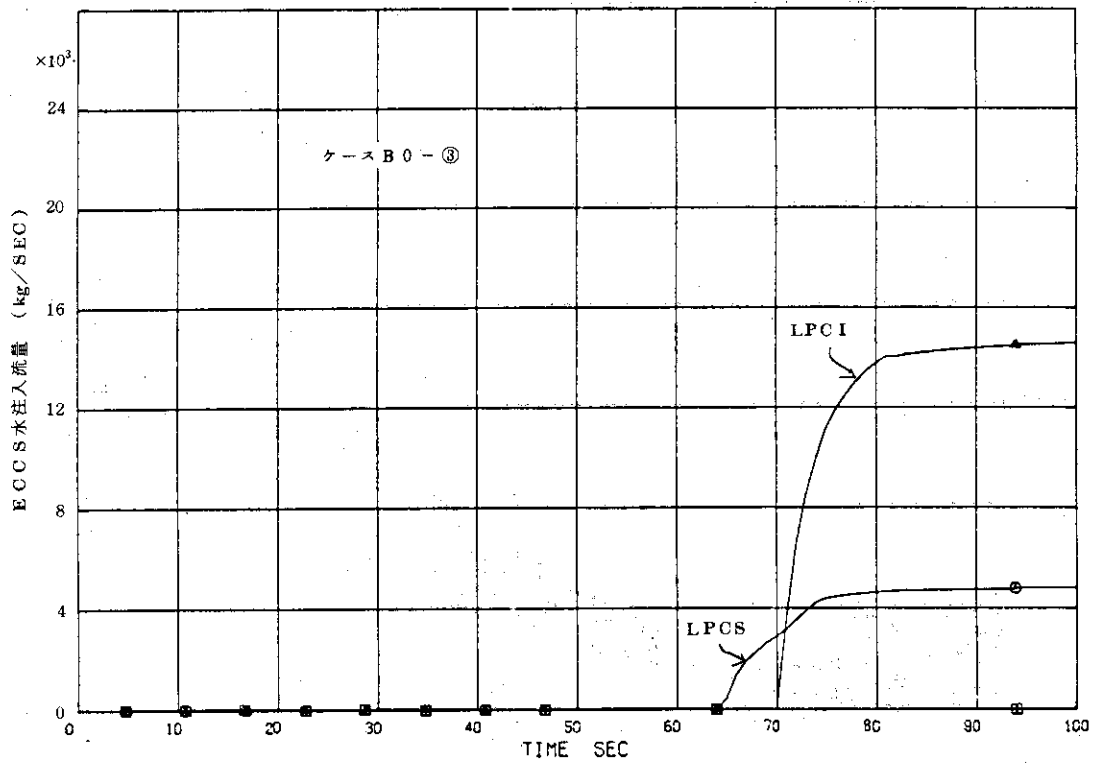


Fig. A.15 ケース B0-③のECCS水注入流量

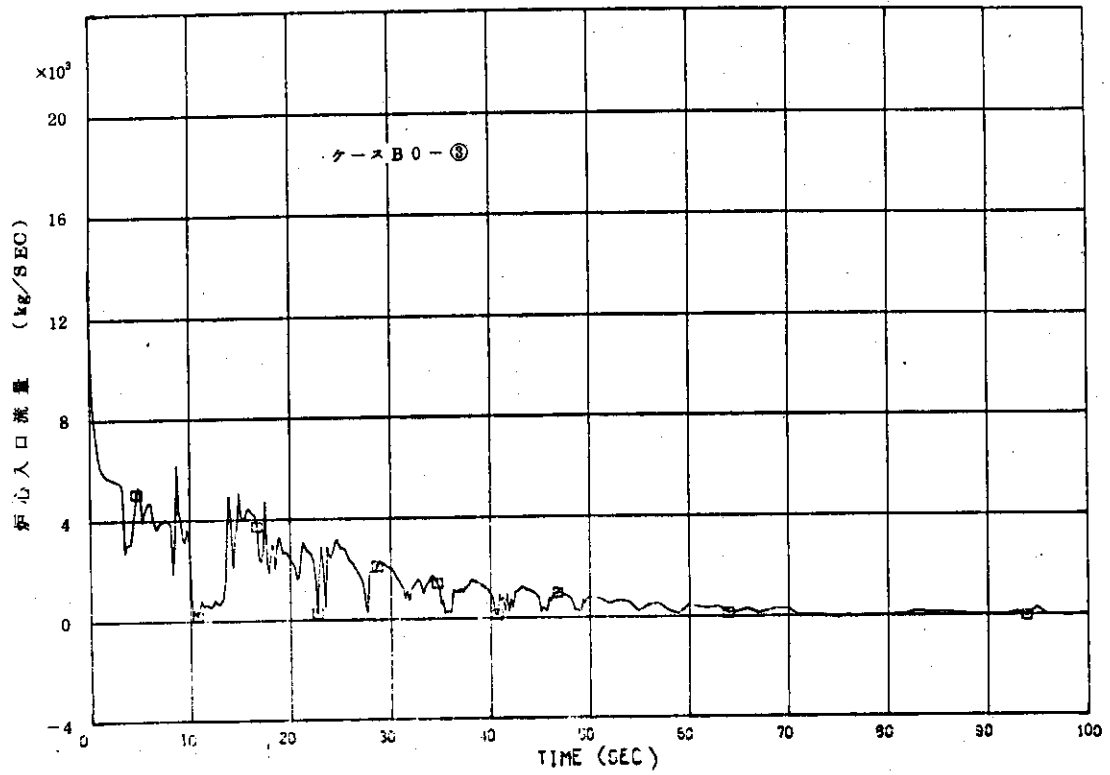


Fig. A. 16 ケース B0-3 の炉心入口流量

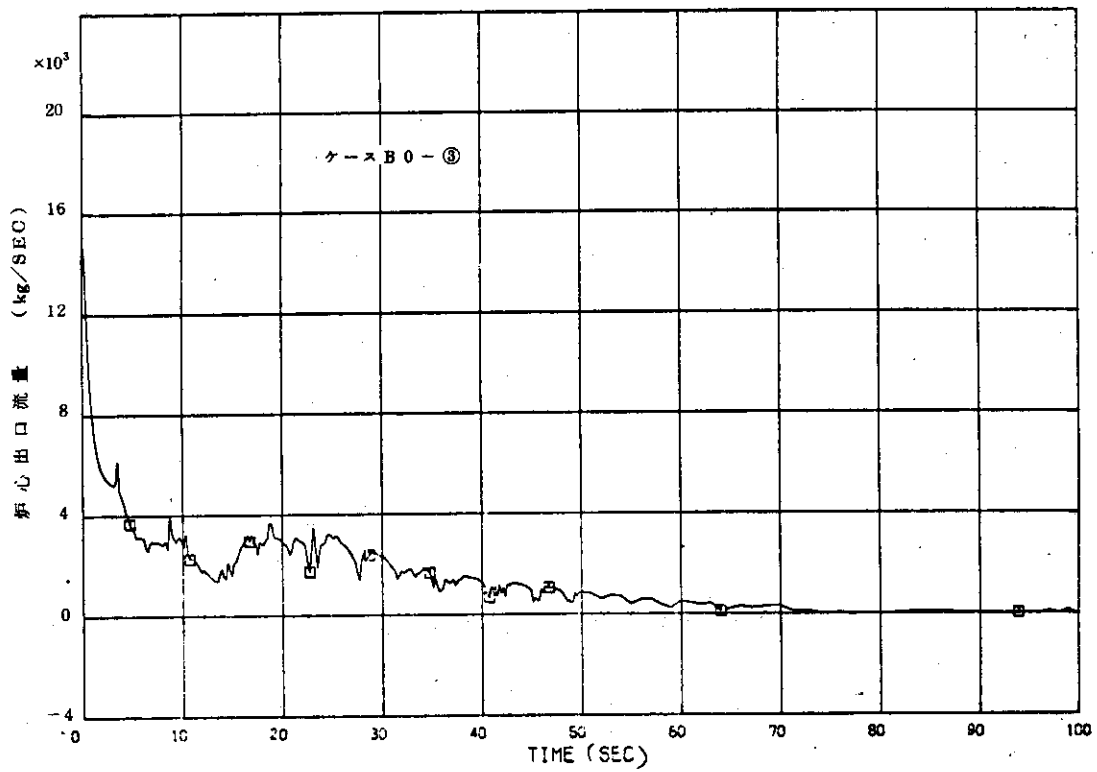


Fig. A. 17 ケース B0-3 の炉心出口流量

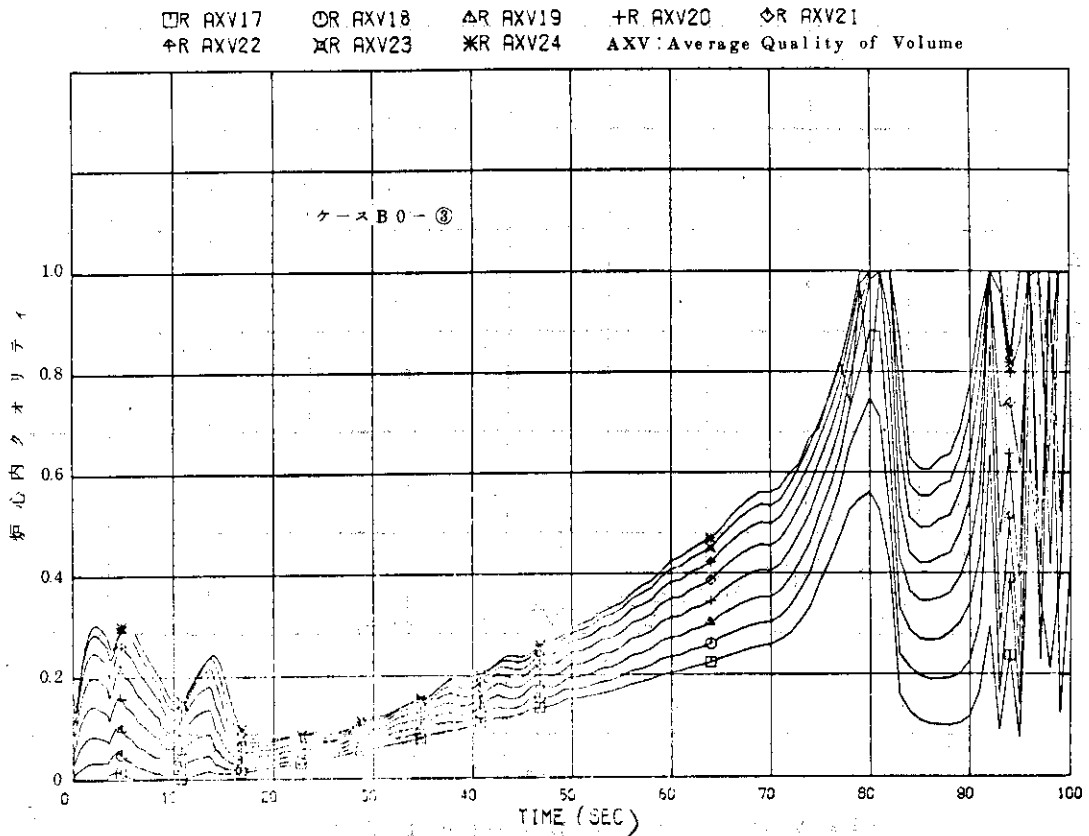


Fig. A. 18 ケースB0-③の炉心内クオリティ

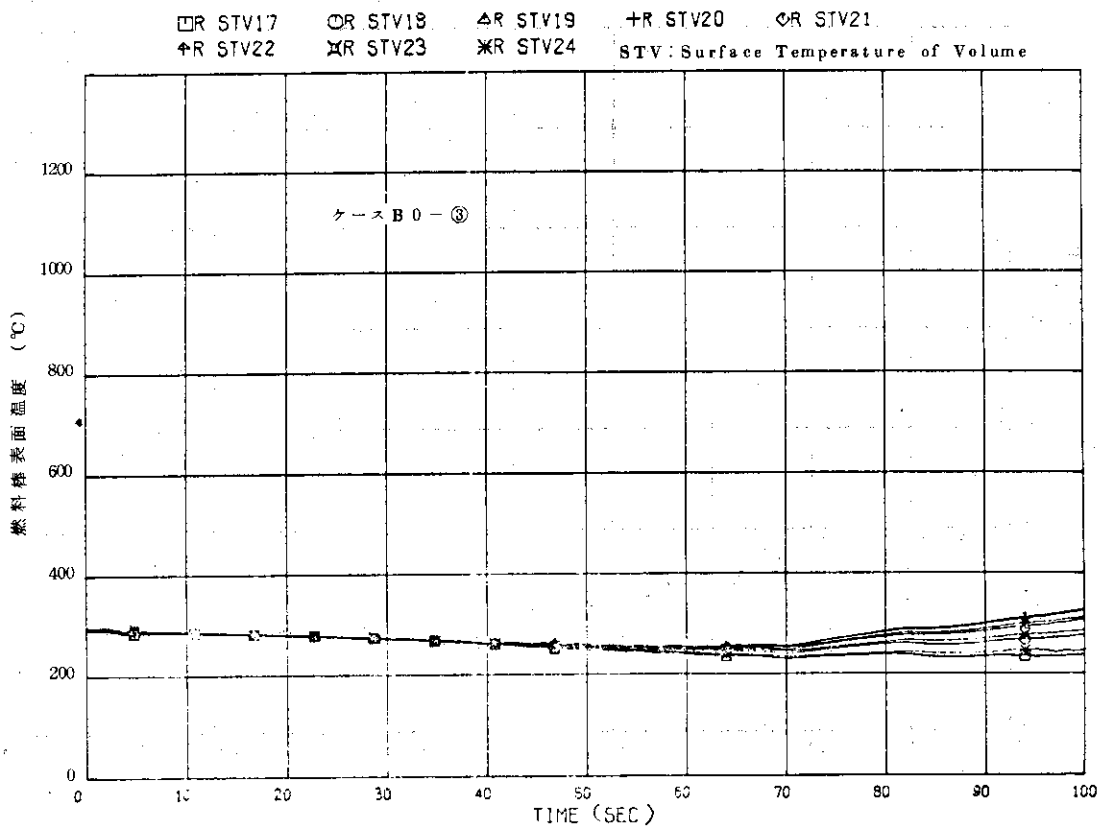


Fig. A. 19 ケースB0-③の燃料棒被ふく管表面温度

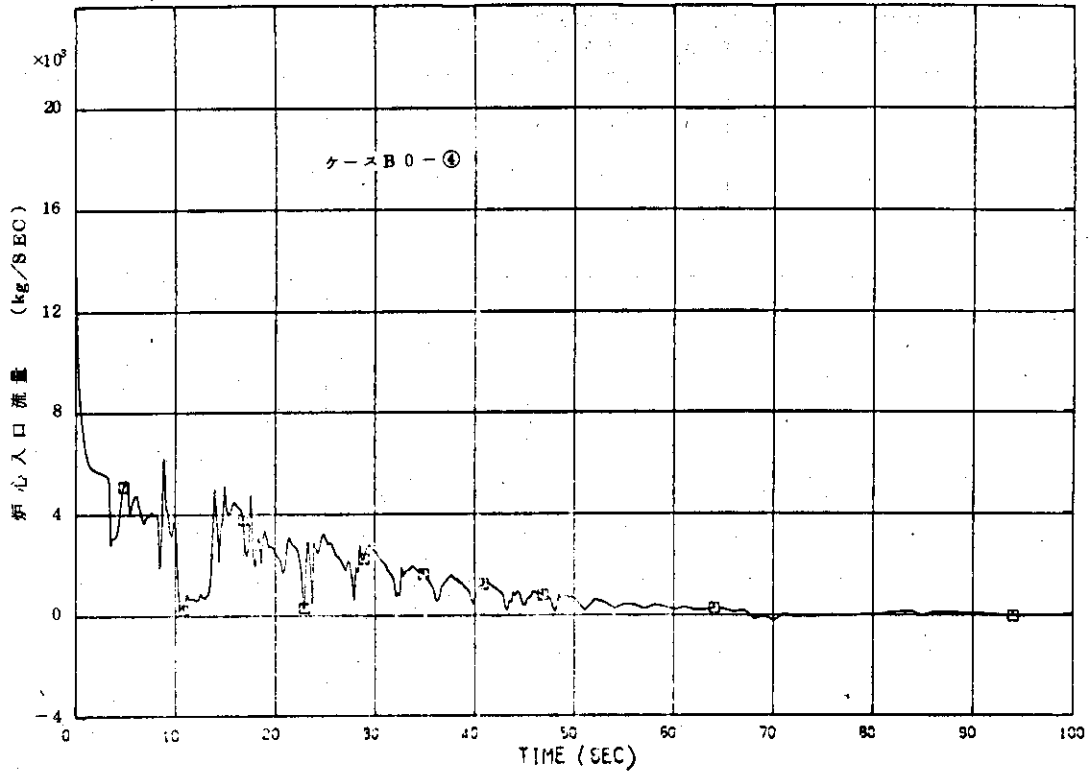


Fig. A. 20 ケース B0-④の炉心入口流量

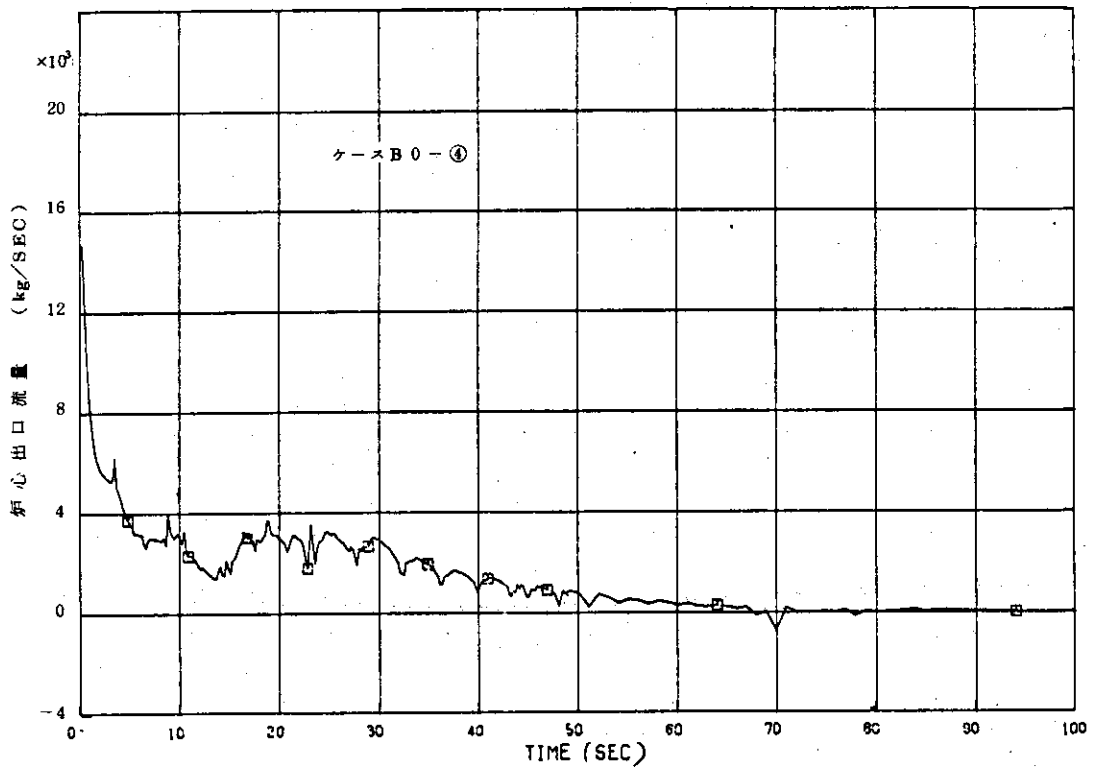


Fig. A. 21 ケース B0-④の炉心出口流量

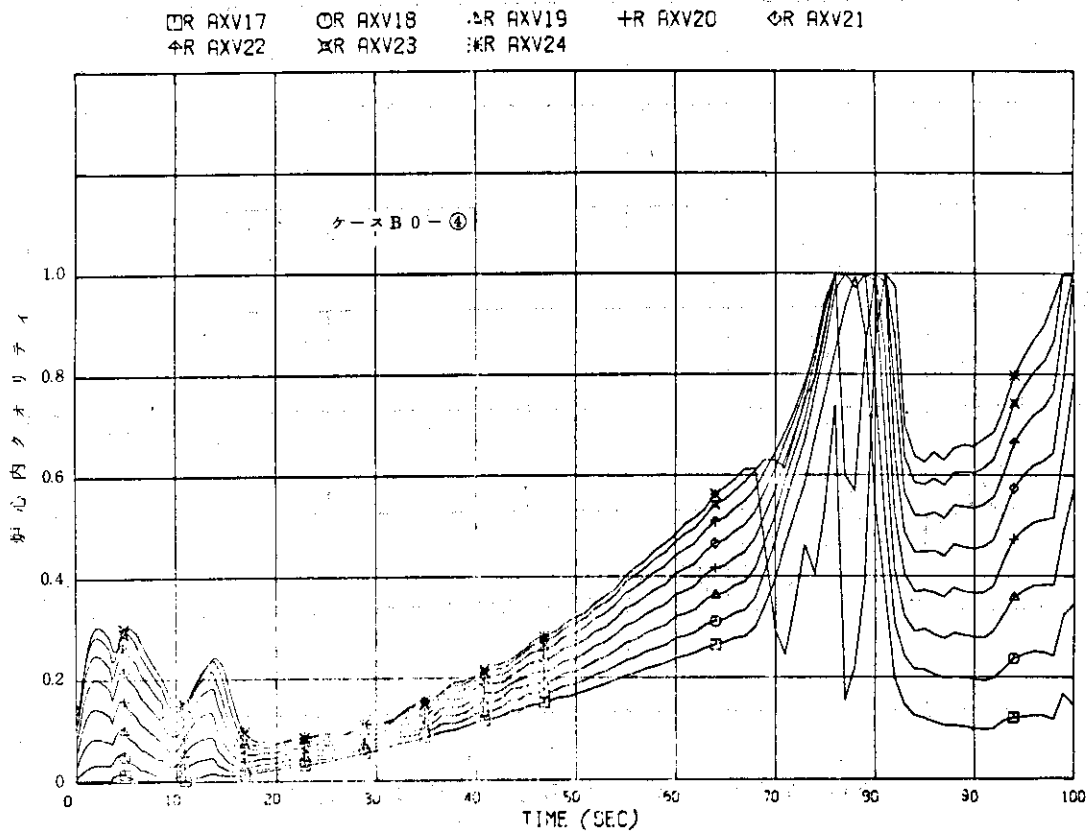


Fig. A.22 ケース B 0 - ④ の炉心内クオリティ

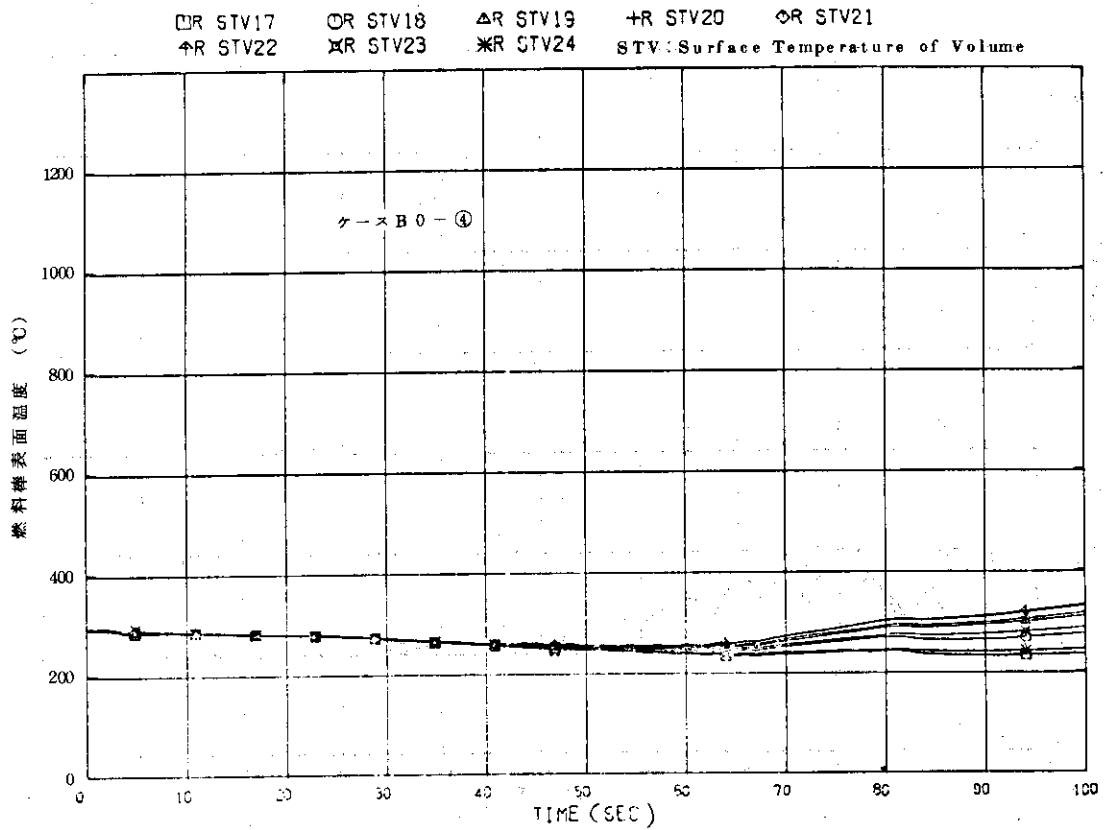


Fig. A.23 ケース B 0 - ④ の燃料棒被ふく管表面温度

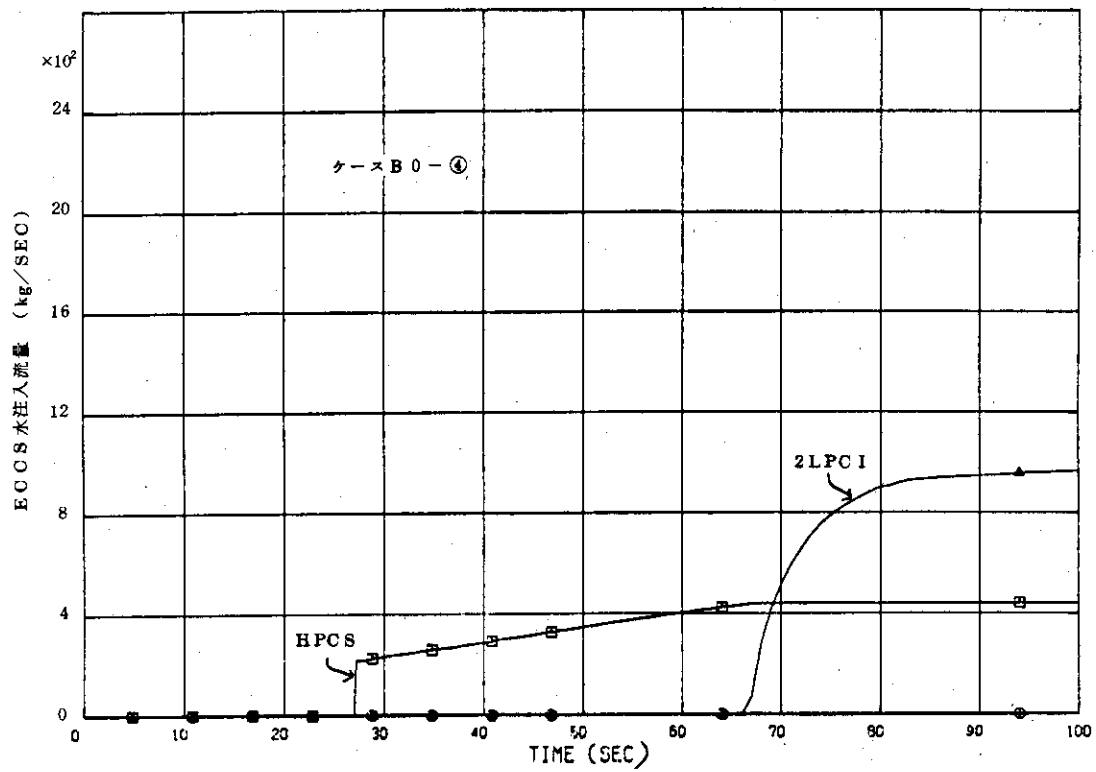


Fig. A.24 ケースB0-4のECCS水注入流量

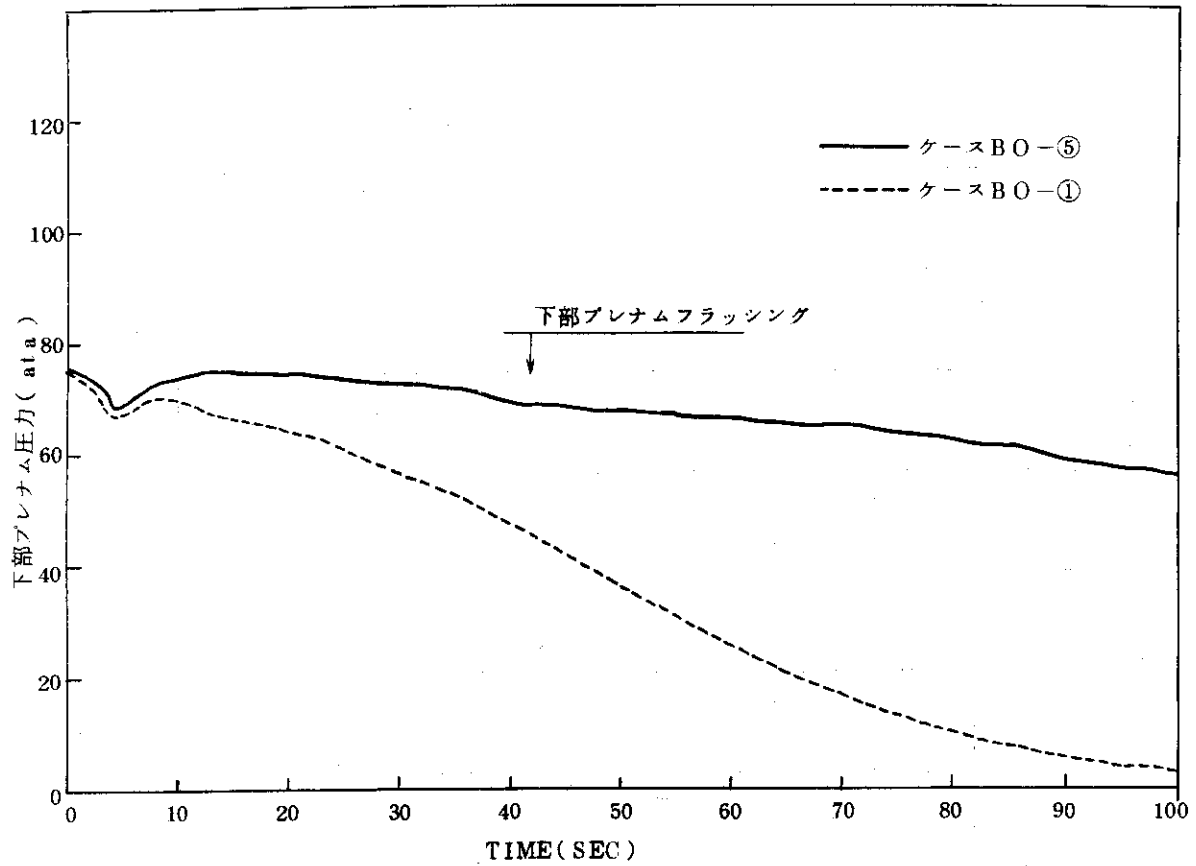


Fig. A.25 ケースBO-①と⑤の下部ピレナム圧力

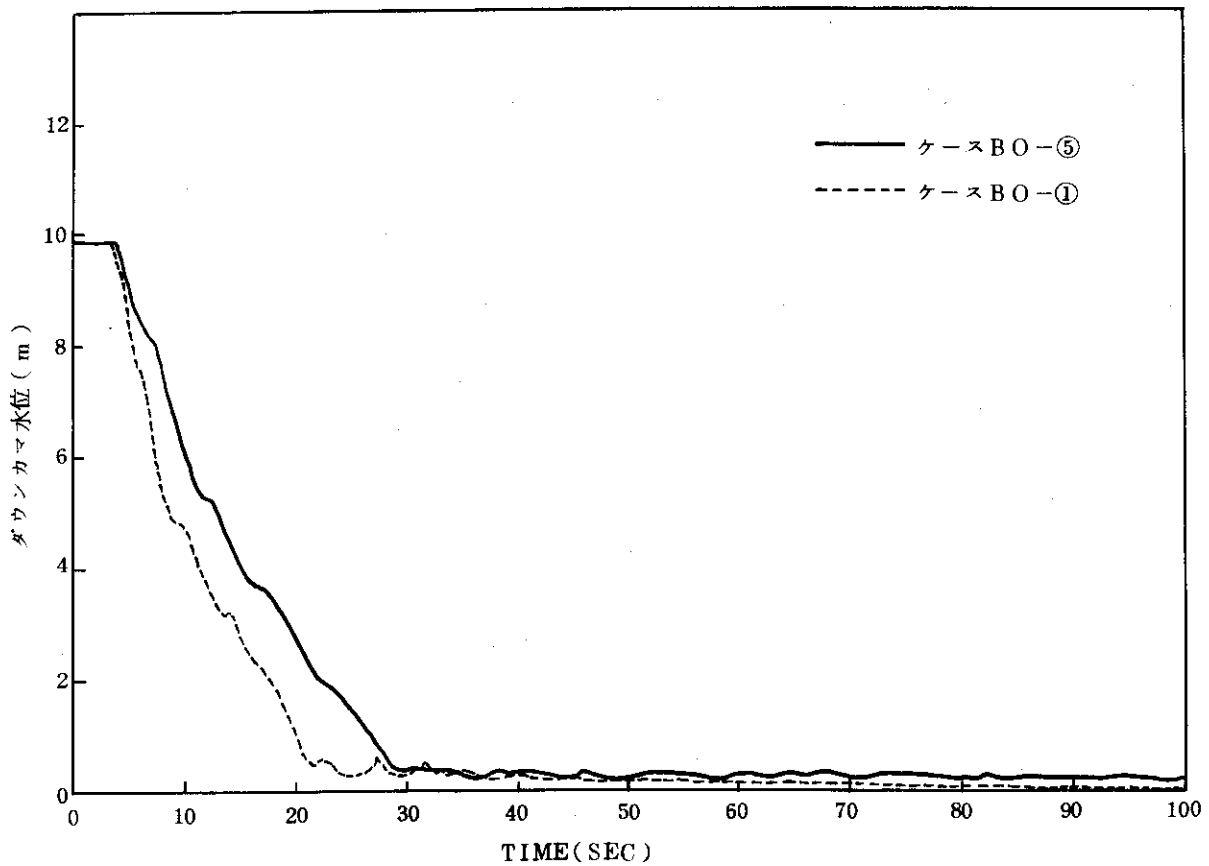


Fig. A.26 ケースBO-①と⑤のダウンカマ-水位

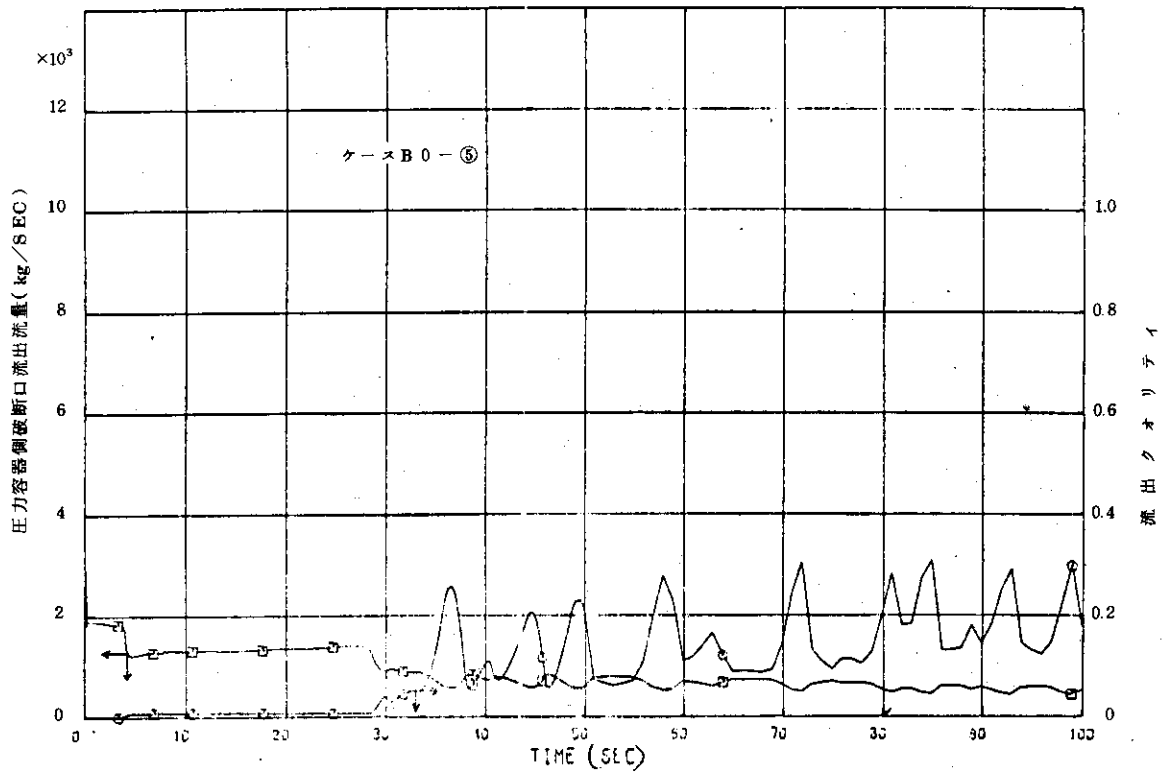


Fig. A. 27 ケースB0-⑤のPV側流出流量とクオリティ

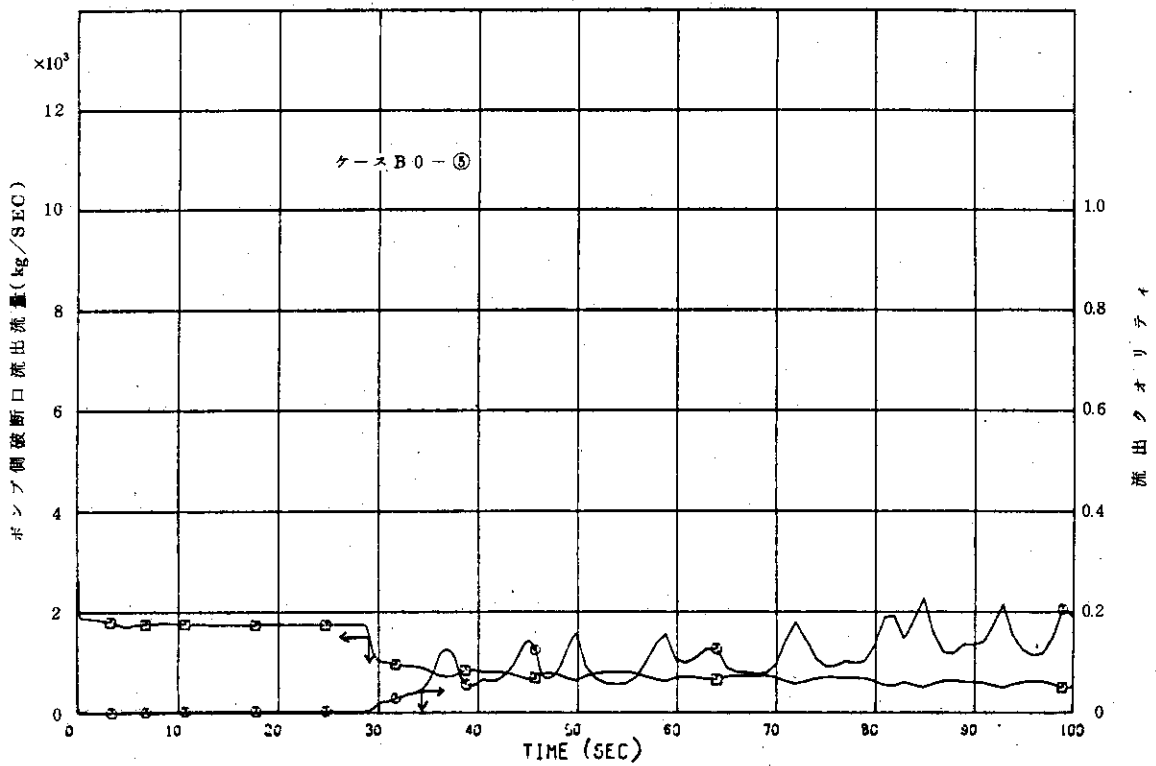


Fig. A. 28 ケースB0-⑤のポンプ側流量とクオリティ

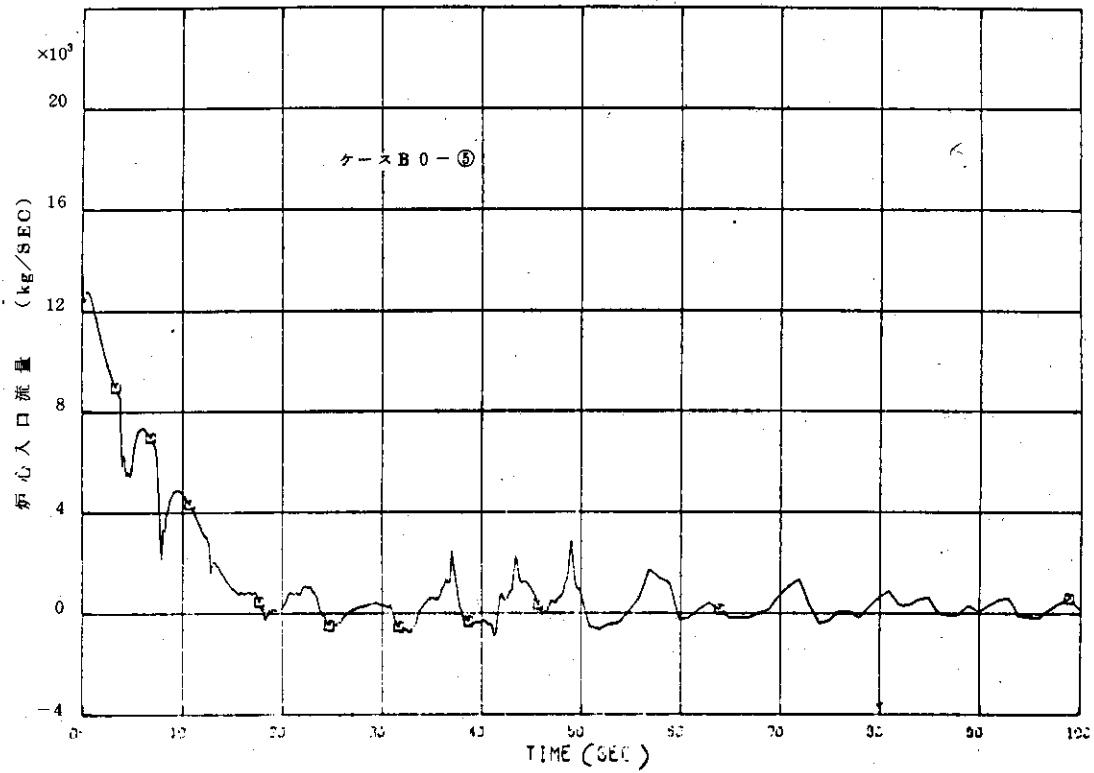


Fig. A. 29 ケースB0-5の炉心入口流量

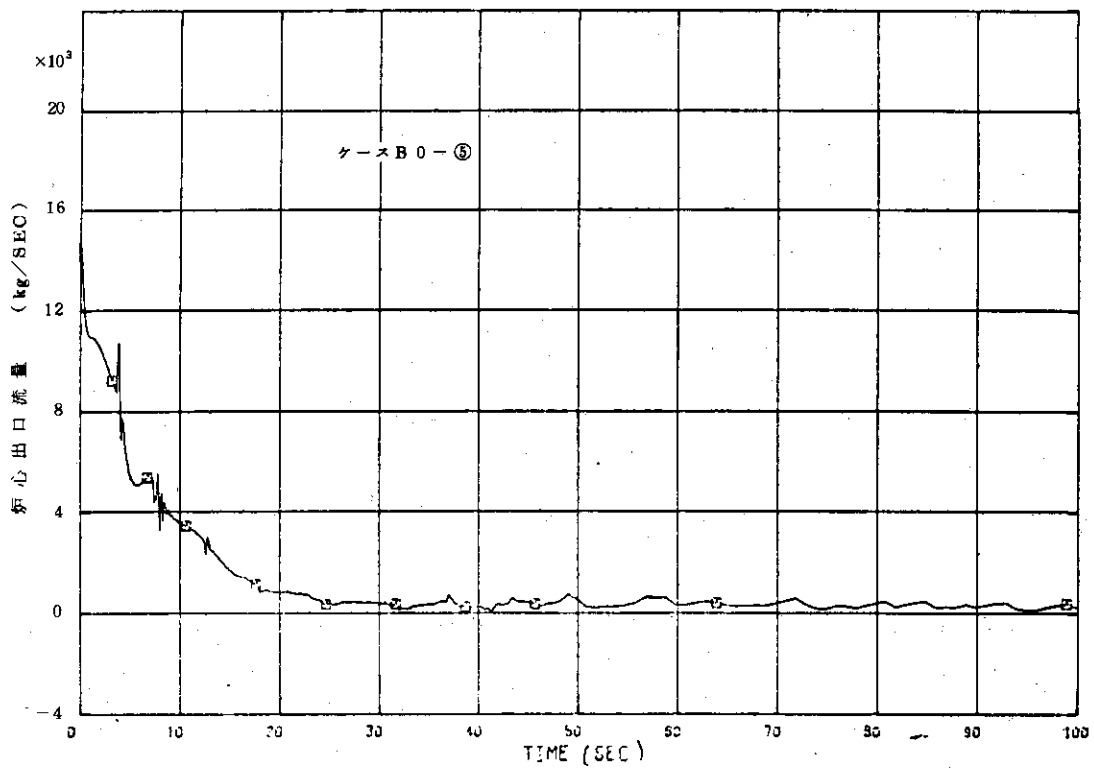


Fig. A. 30 ケースB0-5の炉心出口流量

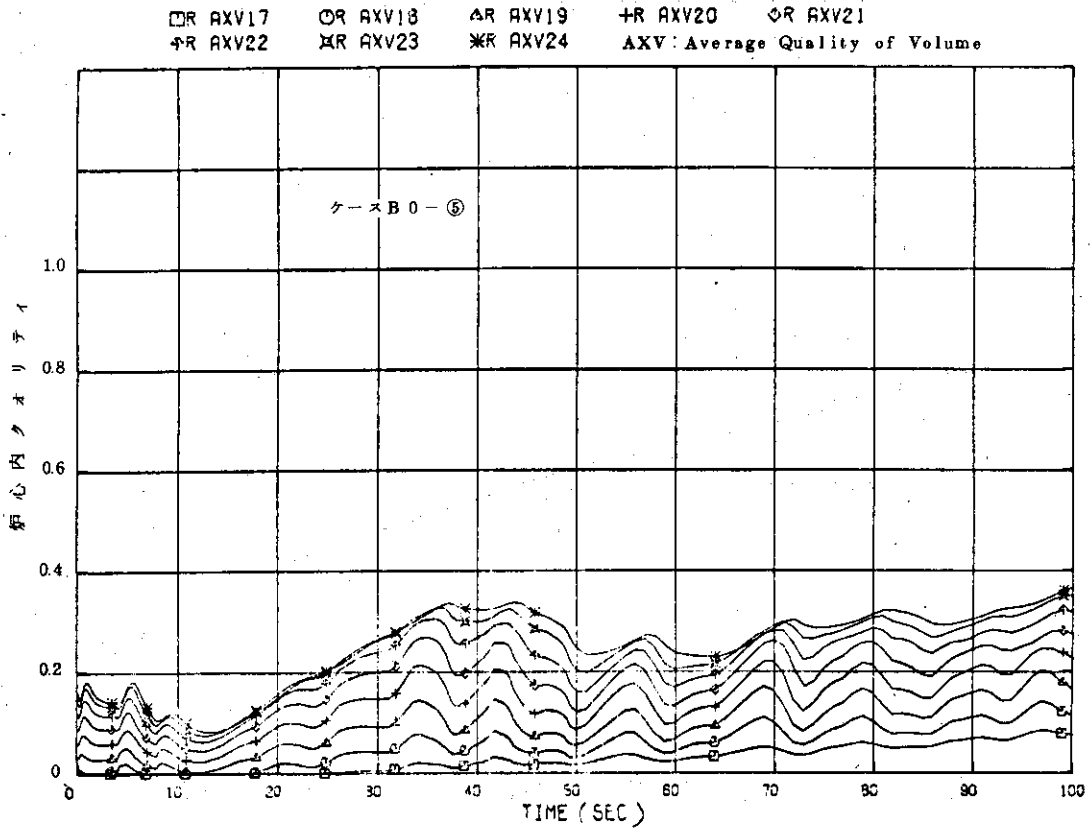


Fig. A. 31 ケース B 0 - ⑤ の炉心内クオリティ

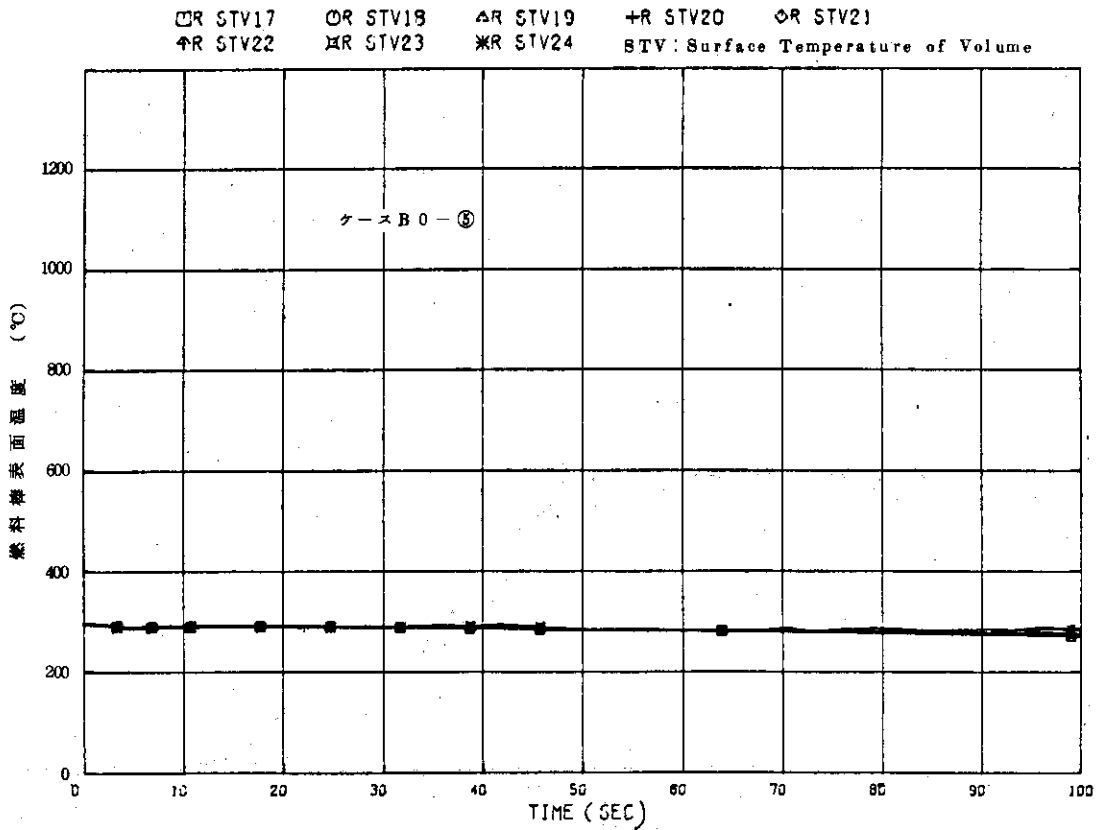


Fig. A. 32 ケース B 0 - ⑤ の燃料棒被ふく管表面温度

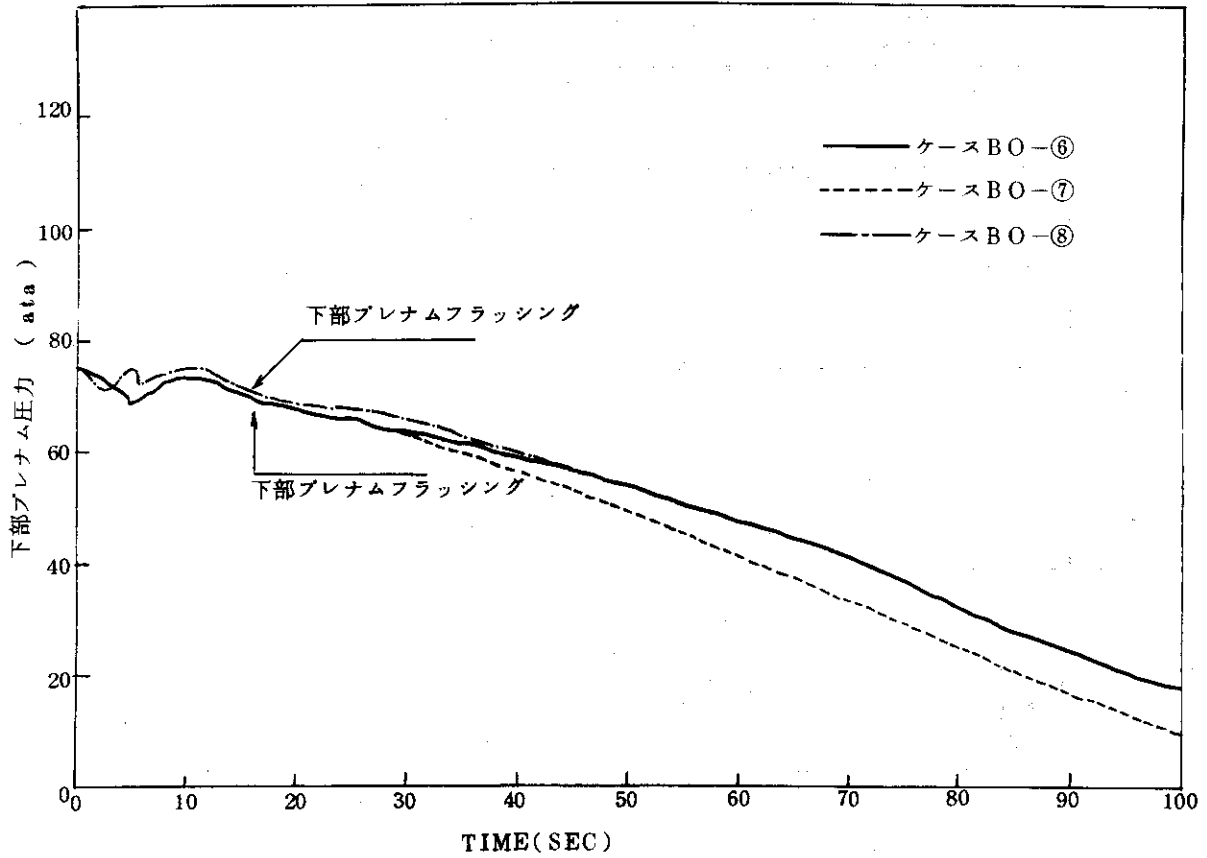


Fig. A. 33 ケースBO-⑥~⑧の下部プレナム圧力

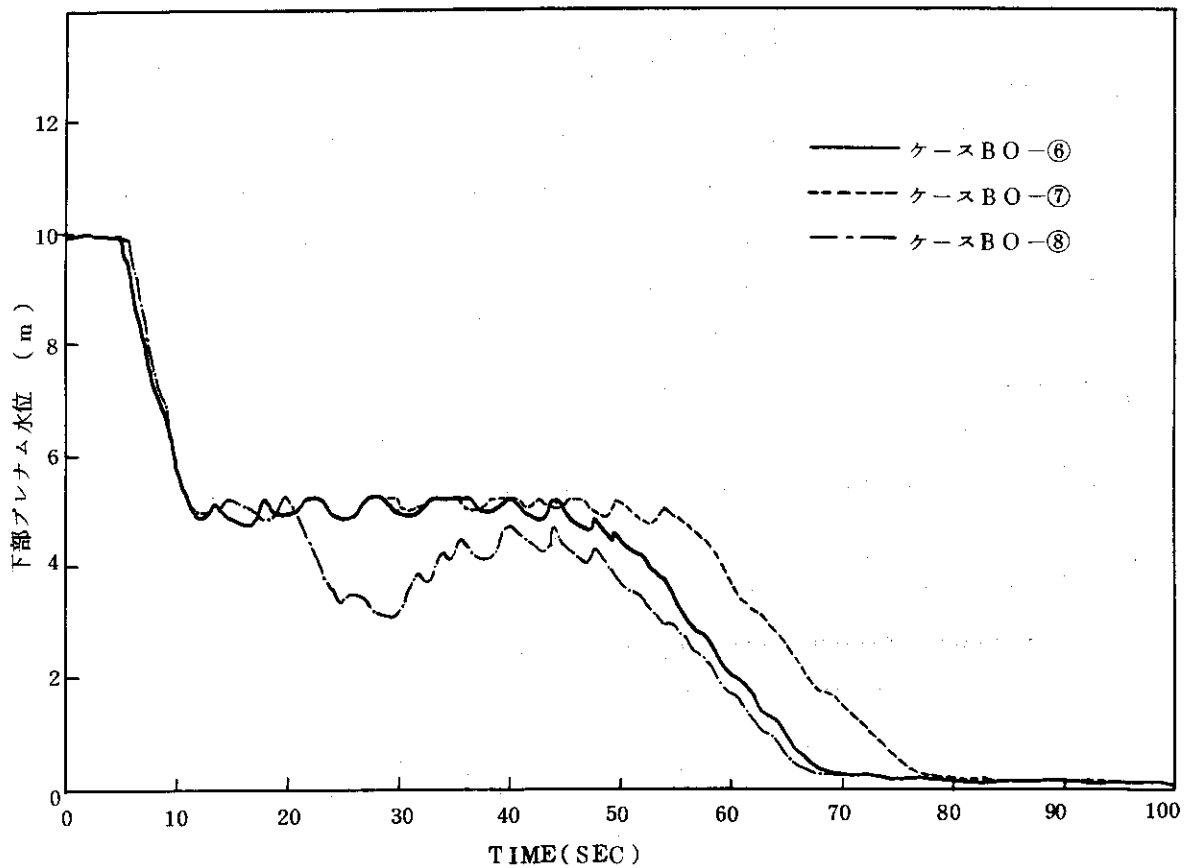


Fig. A. 34 ケースBO-⑥~⑧の下部プレナム水位

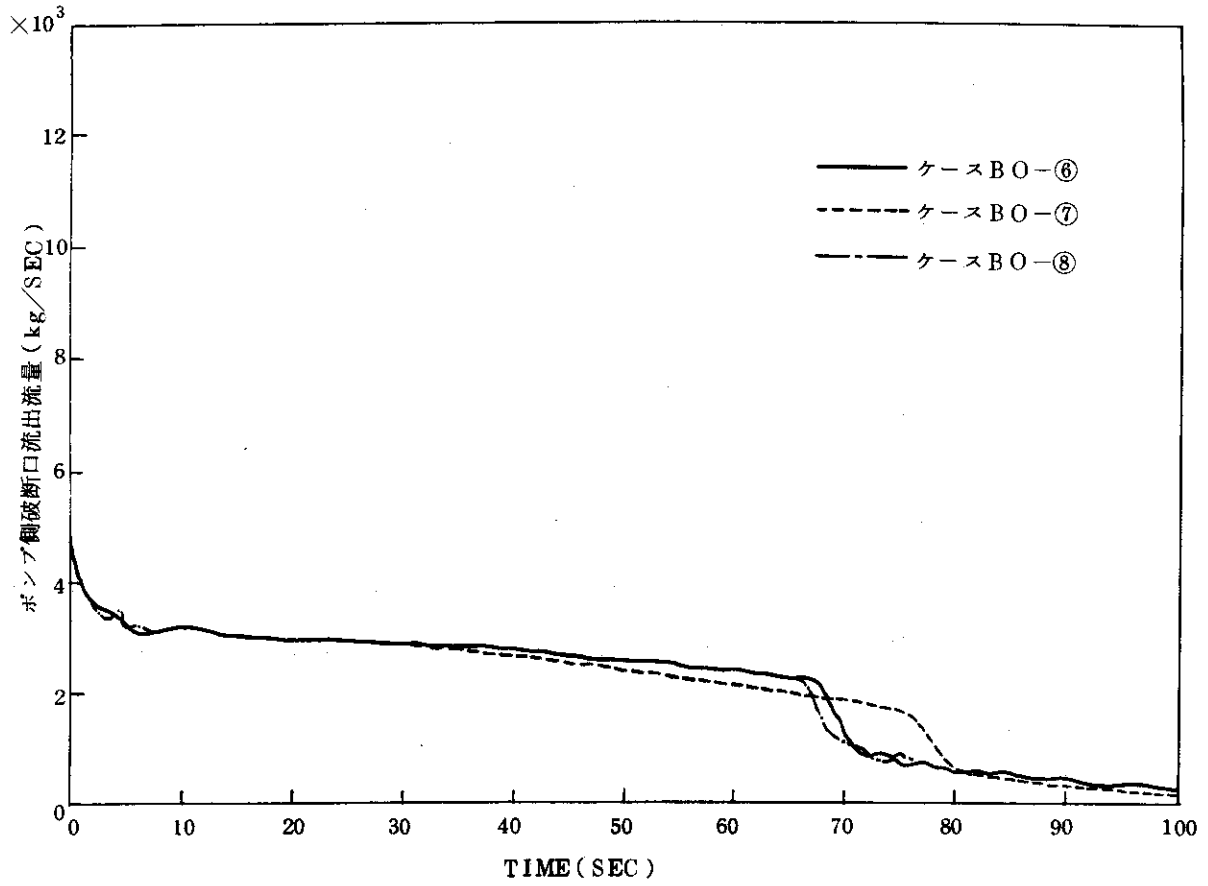


Fig. A. 35 ケースBO-⑥~⑧のポンプ側流出流量

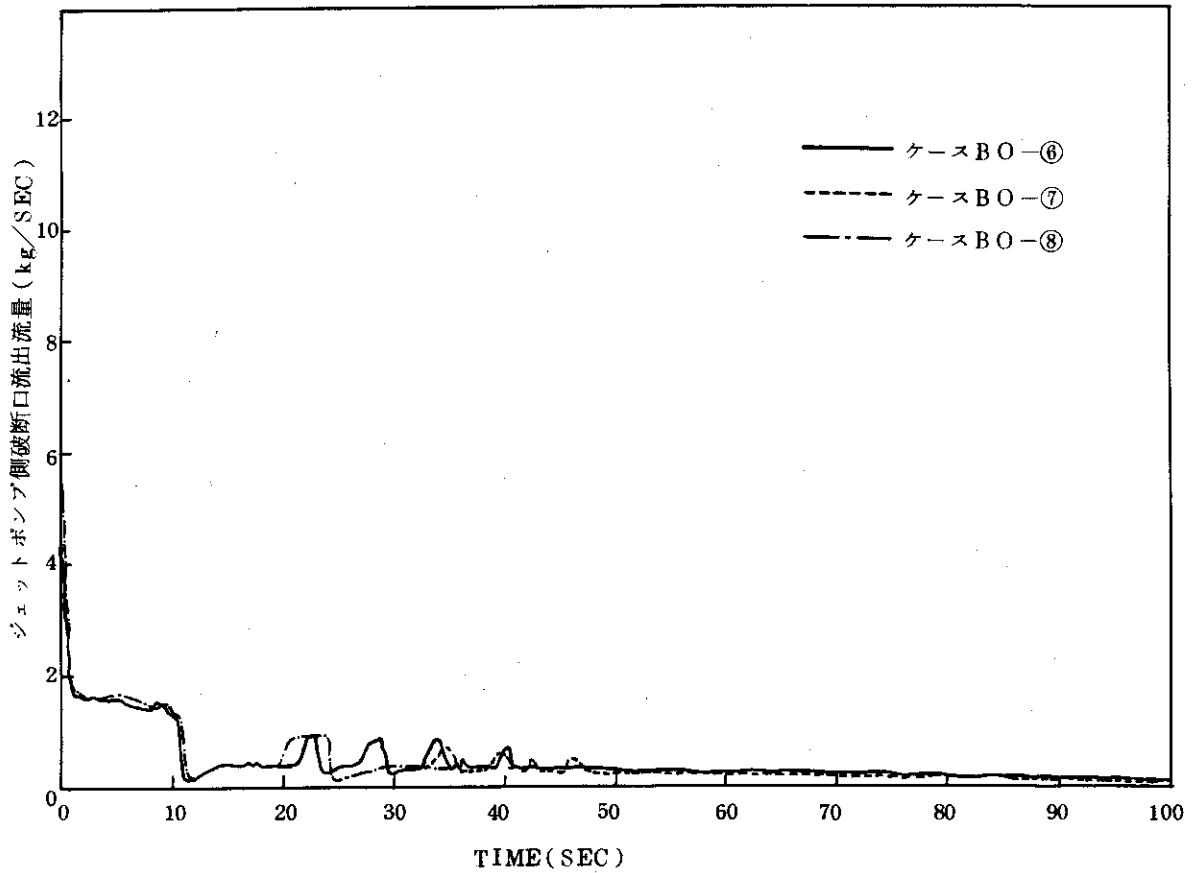


Fig. A. 36 ケースBO-⑥~⑧のジェットポンプ側流出流量

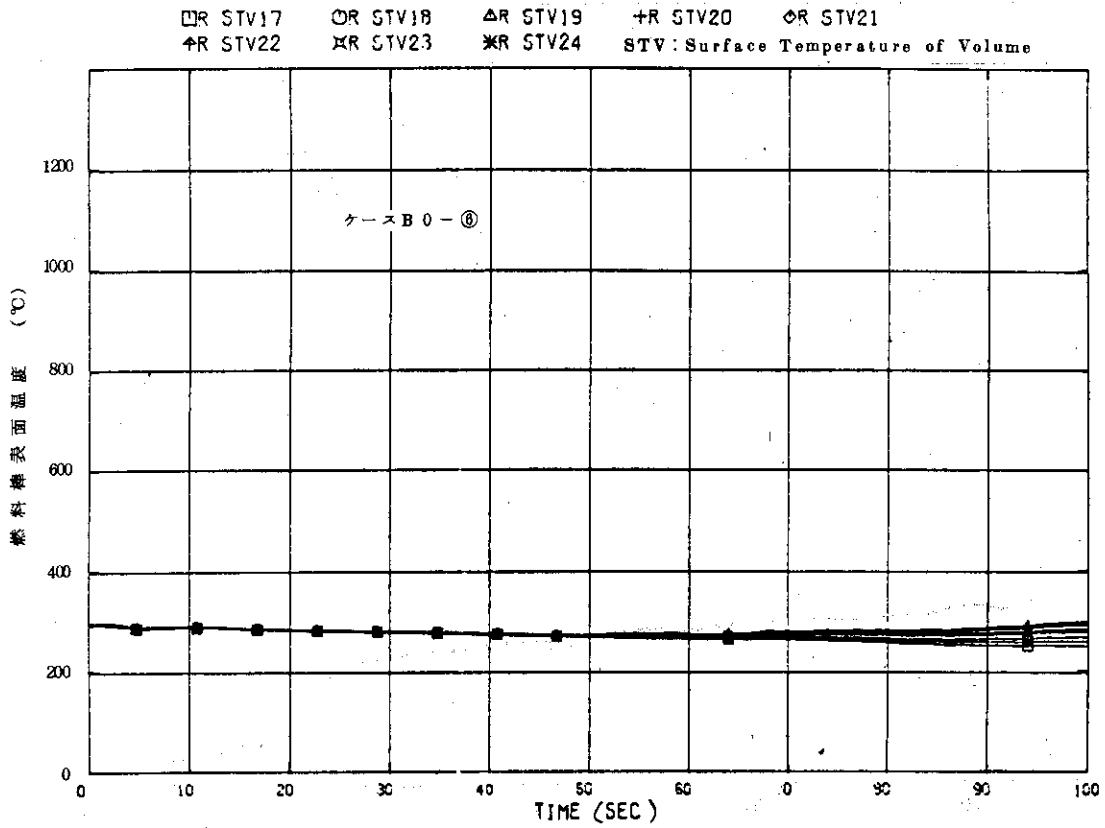


Fig. A. 37 ケース B 0 - ⑥の燃料棒被ふく管表面温度

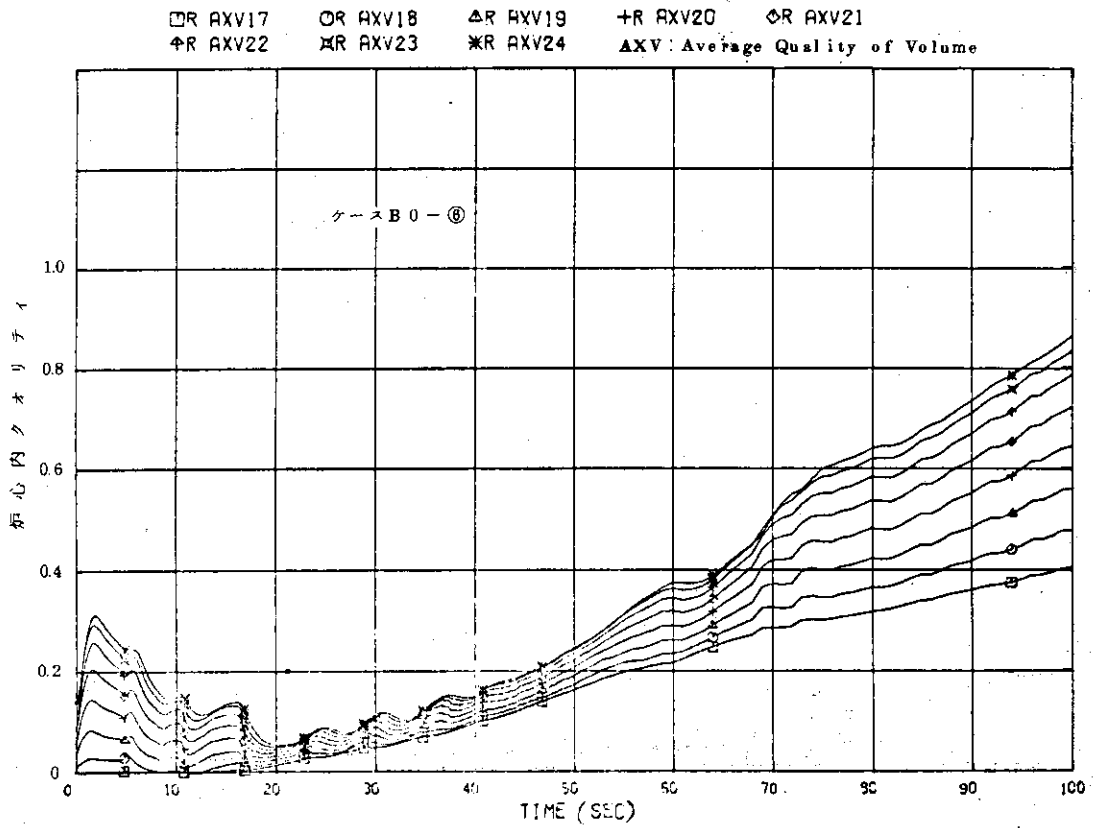


Fig. A. 38 ケース B 0 - ⑥の炉心内クオリティ

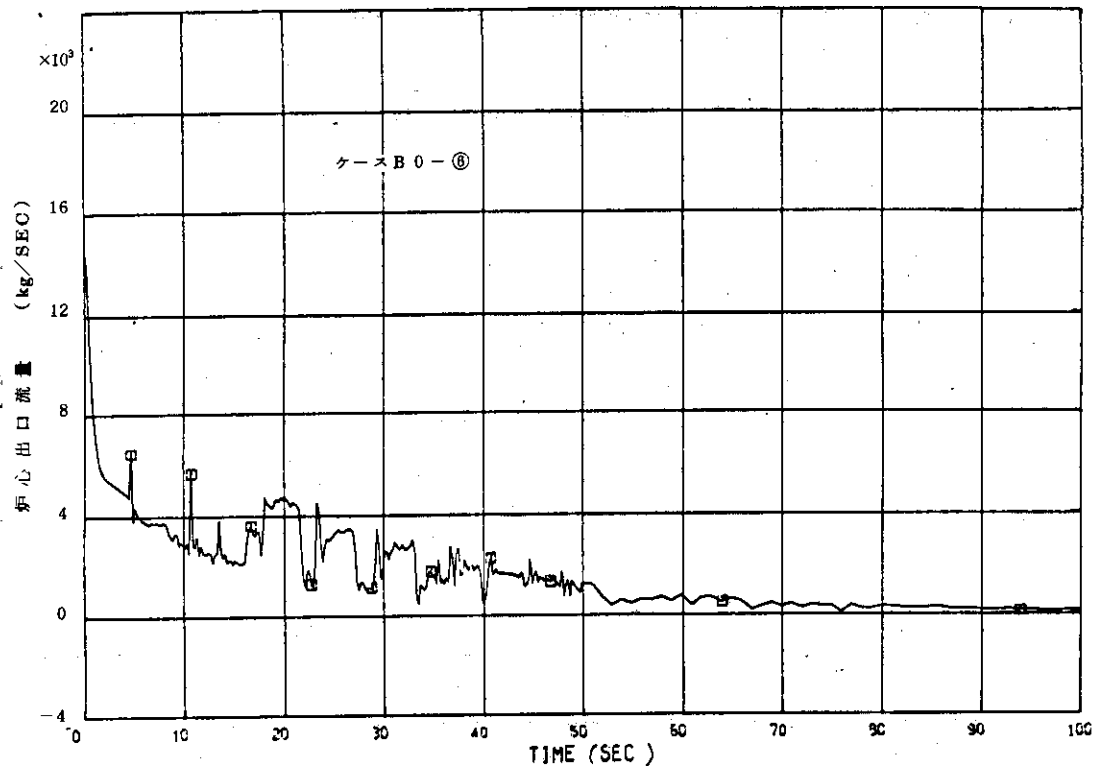


Fig. A. 39 ケース B0-6 の炉心出口流量

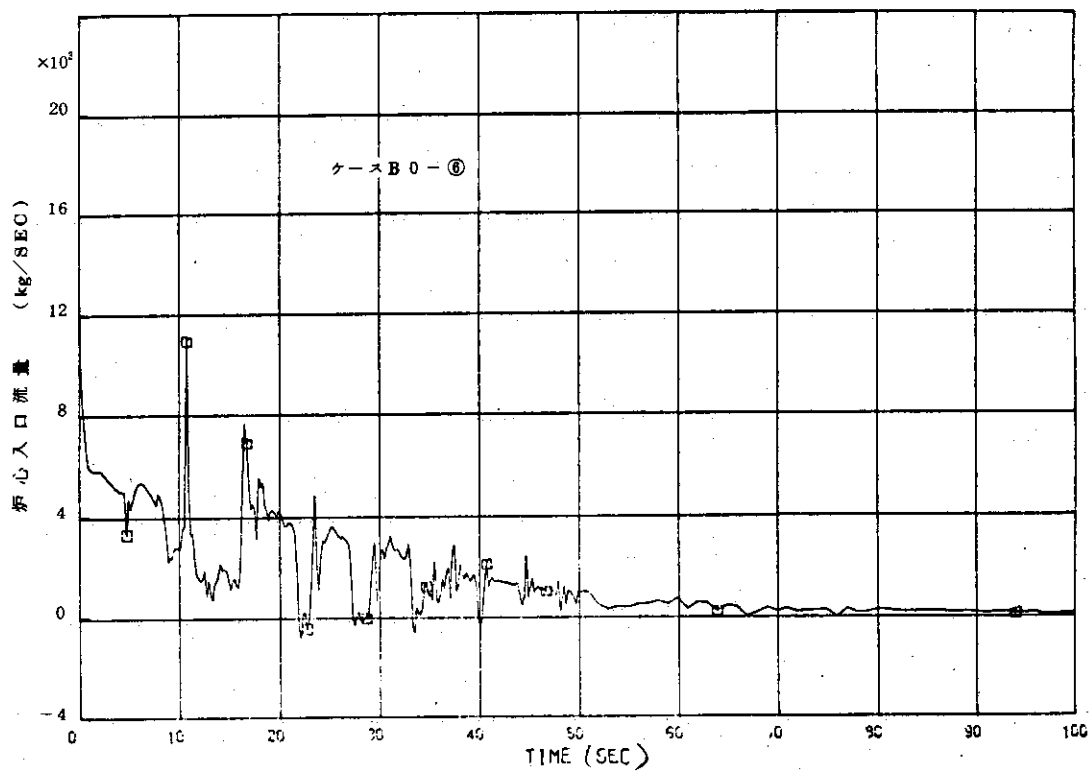


Fig. A. 40 ケース B0-6 の炉心入口流量

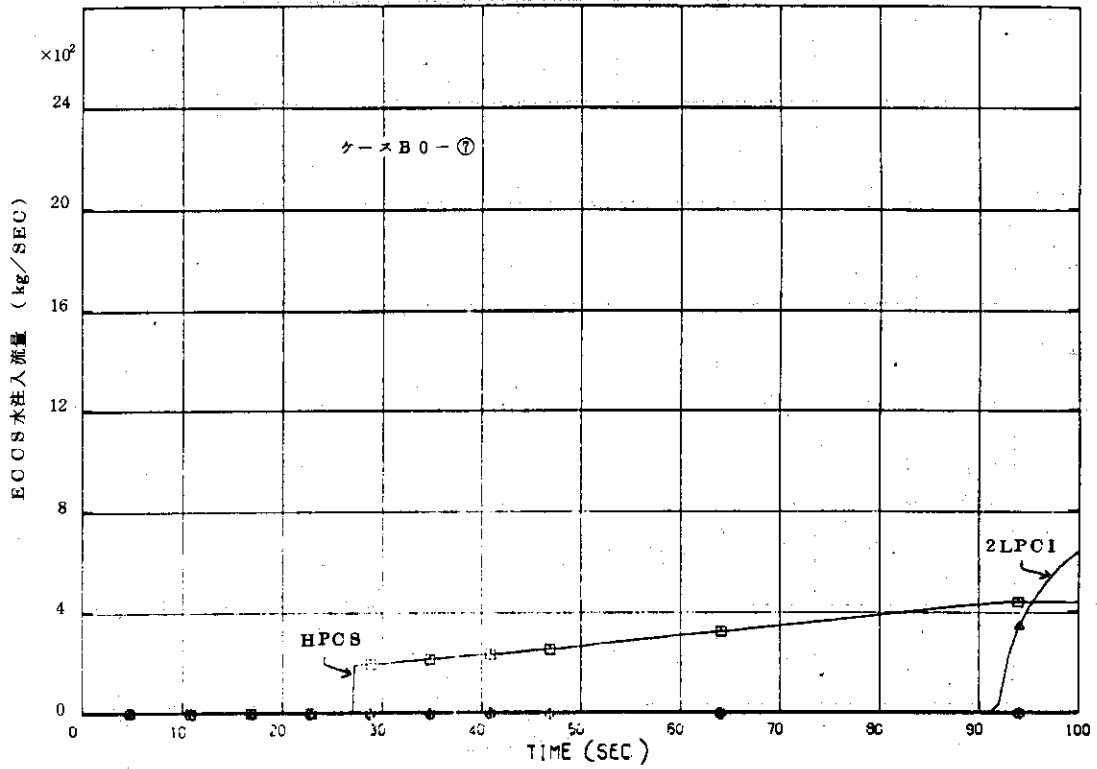


Fig. A.41 ケース B0-⑦の ECCS水注入流量

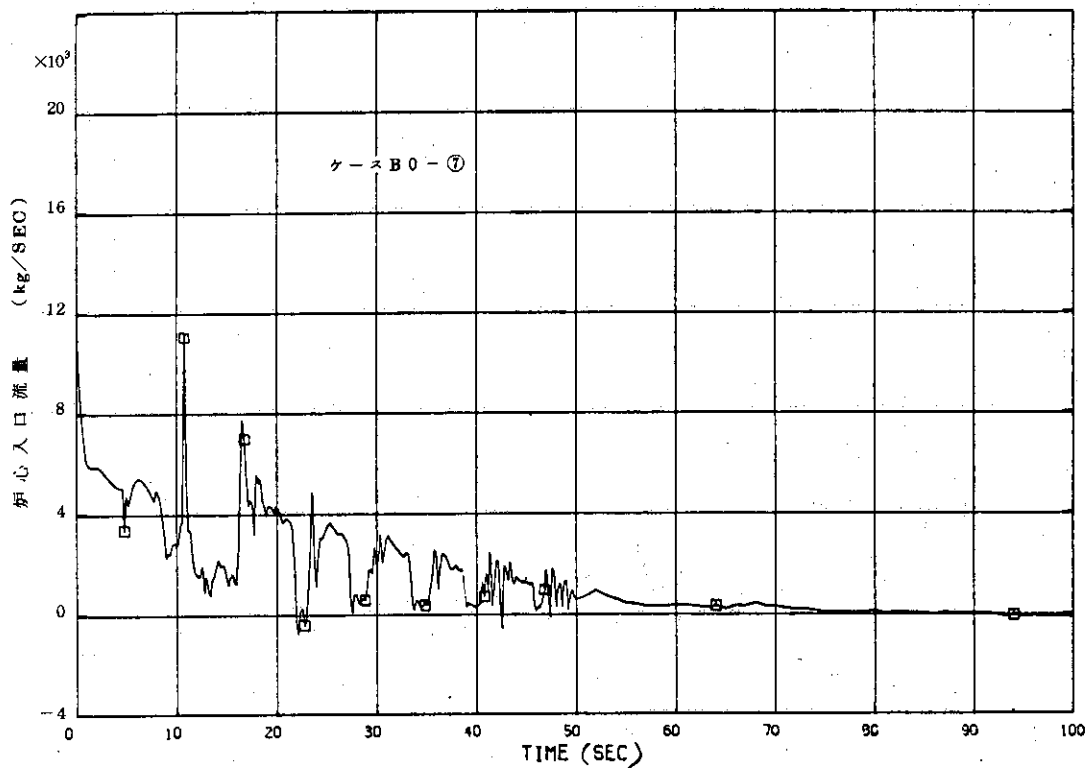


Fig. A.42 ケース B0-⑦の炉心入口流量

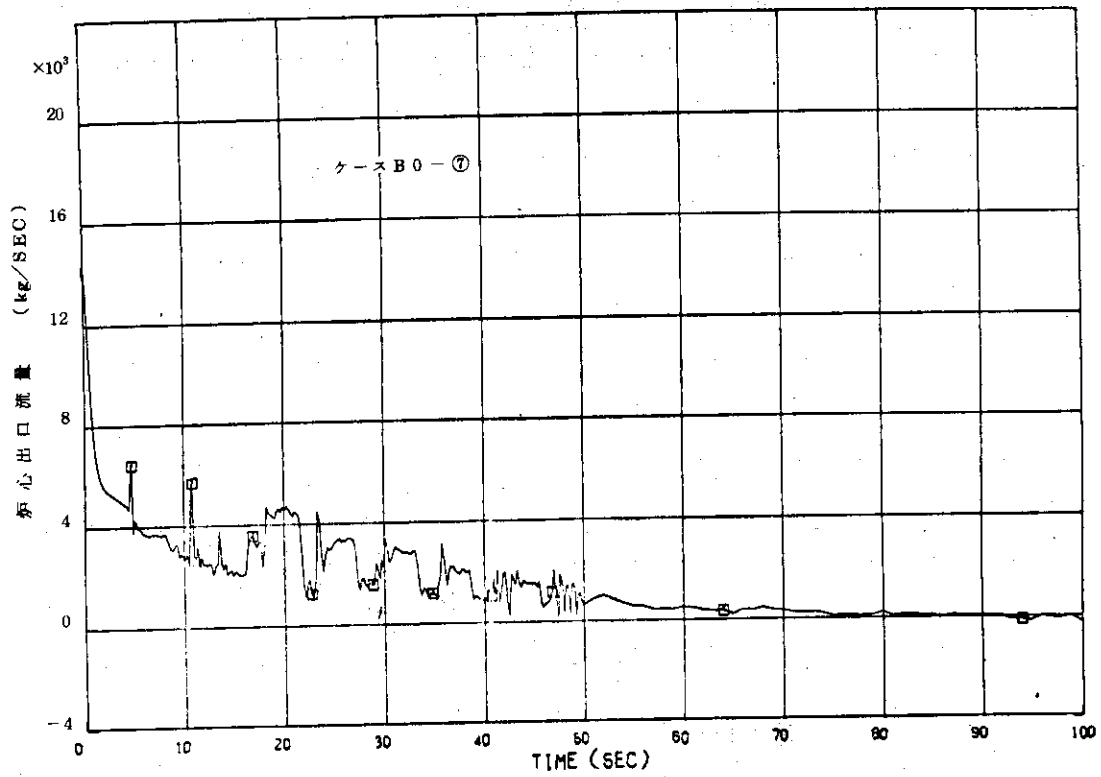


Fig. A. 43 ケース B0-⑦の炉心出口流量

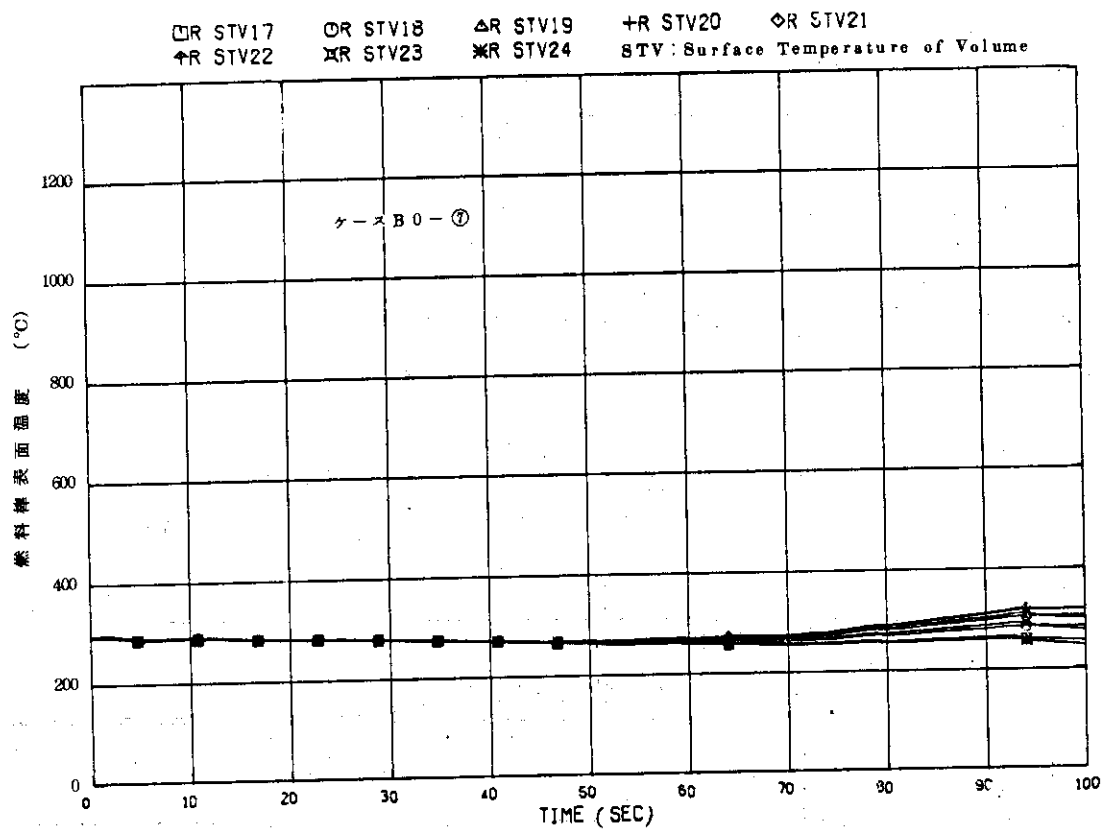


Fig. A. 44 ケース B0-⑦の燃料棒被ふく管表面温度

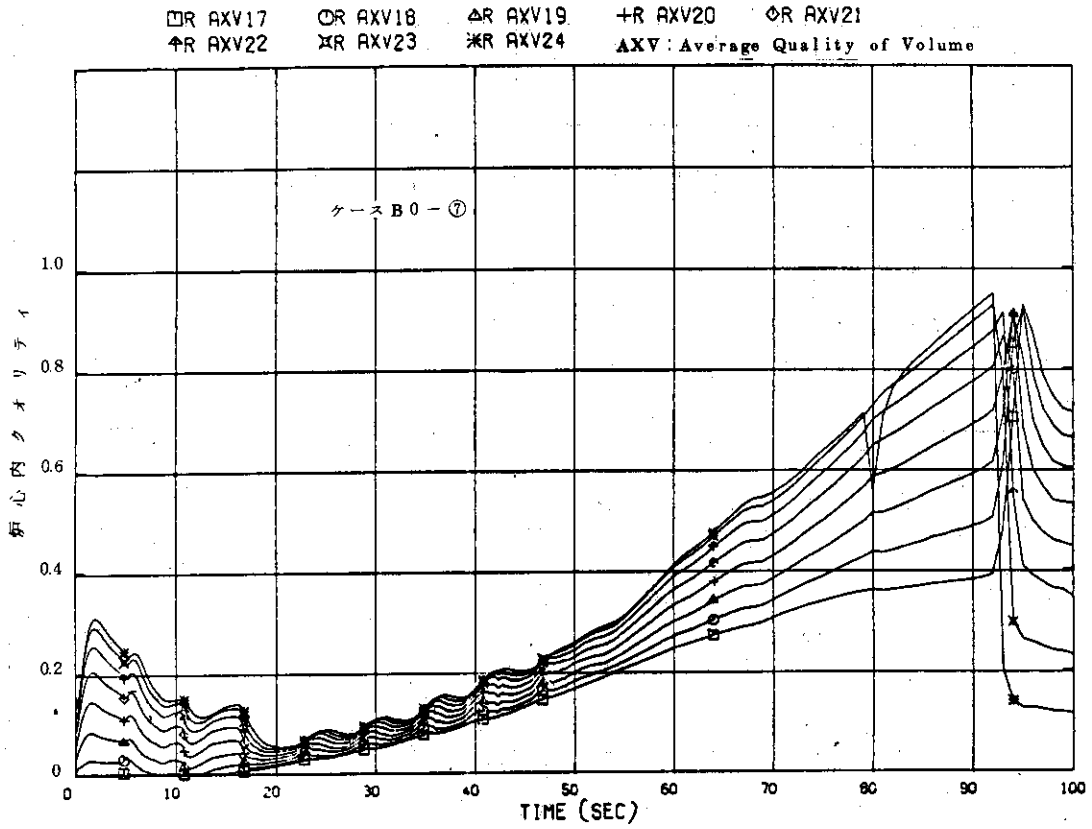


Fig. A. 45 ケース B0-⑦の炉心内クオリティ

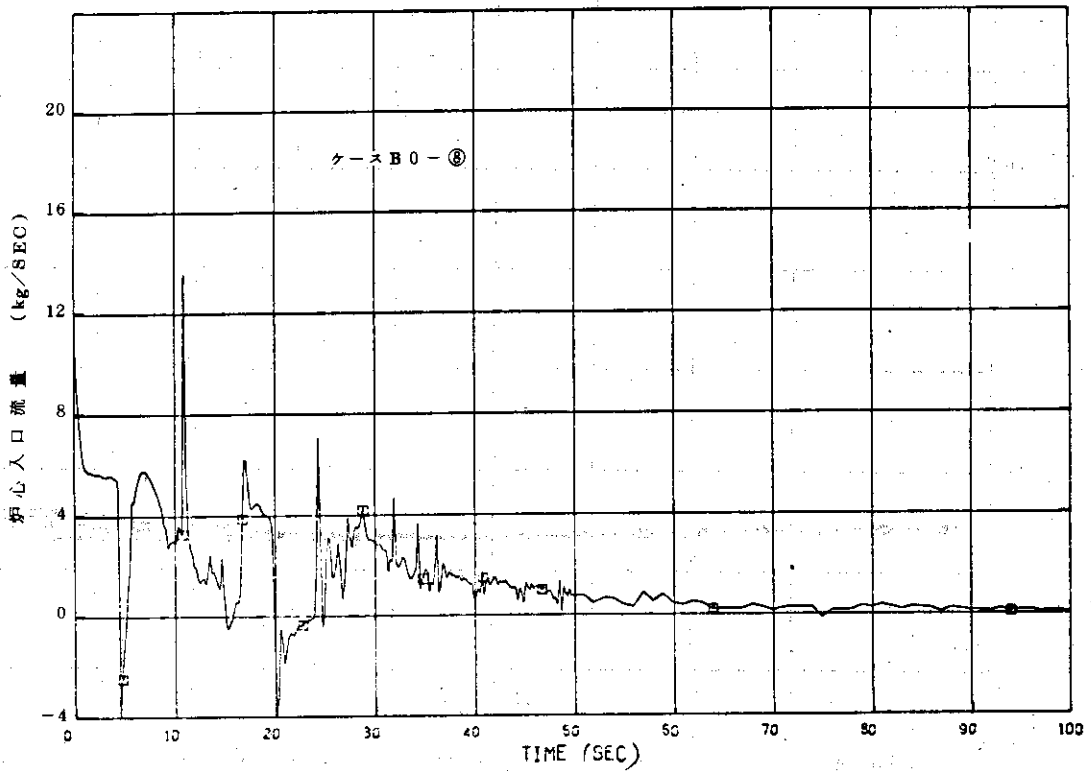


Fig. A. 46 ケース B0-⑧の炉心入口流量

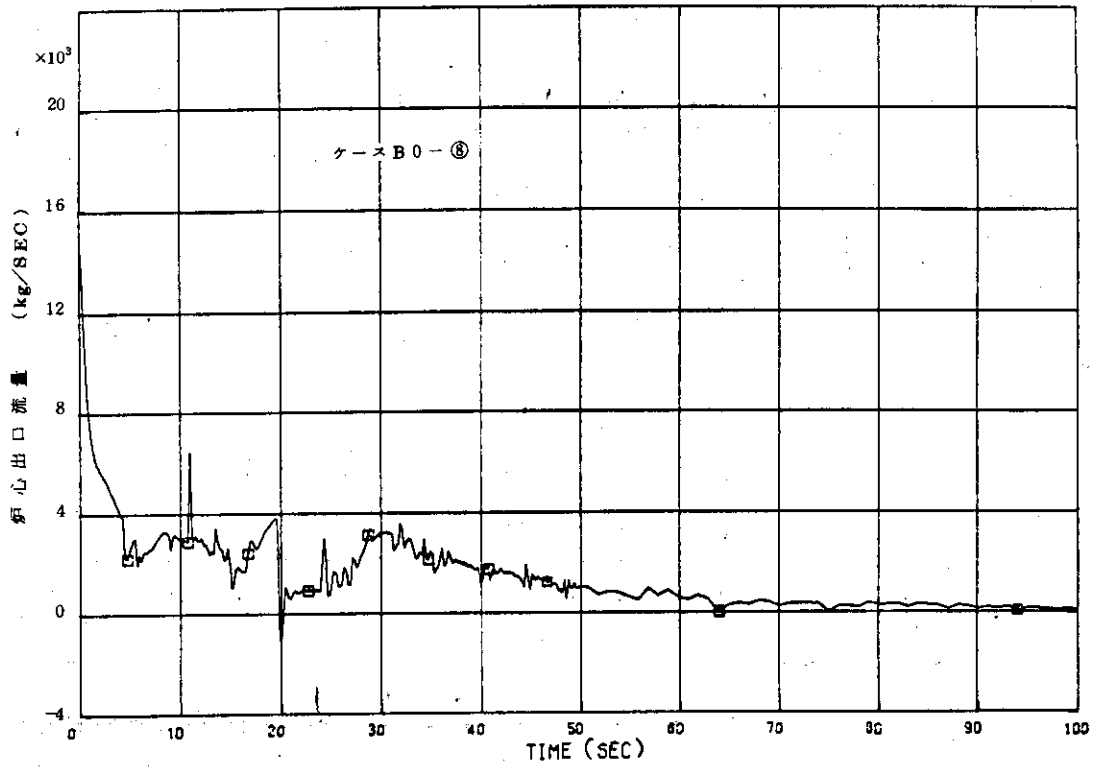


Fig. A. 47 ケースB0-⑧の炉心出口流量

□R AXV17 □R AXV18 △R AXV19 +R AXV20 ◇R AXV21
 ↑R AXV22 ✕R AXV23 ✱R AXV24 AXV: Average Quality of Volume

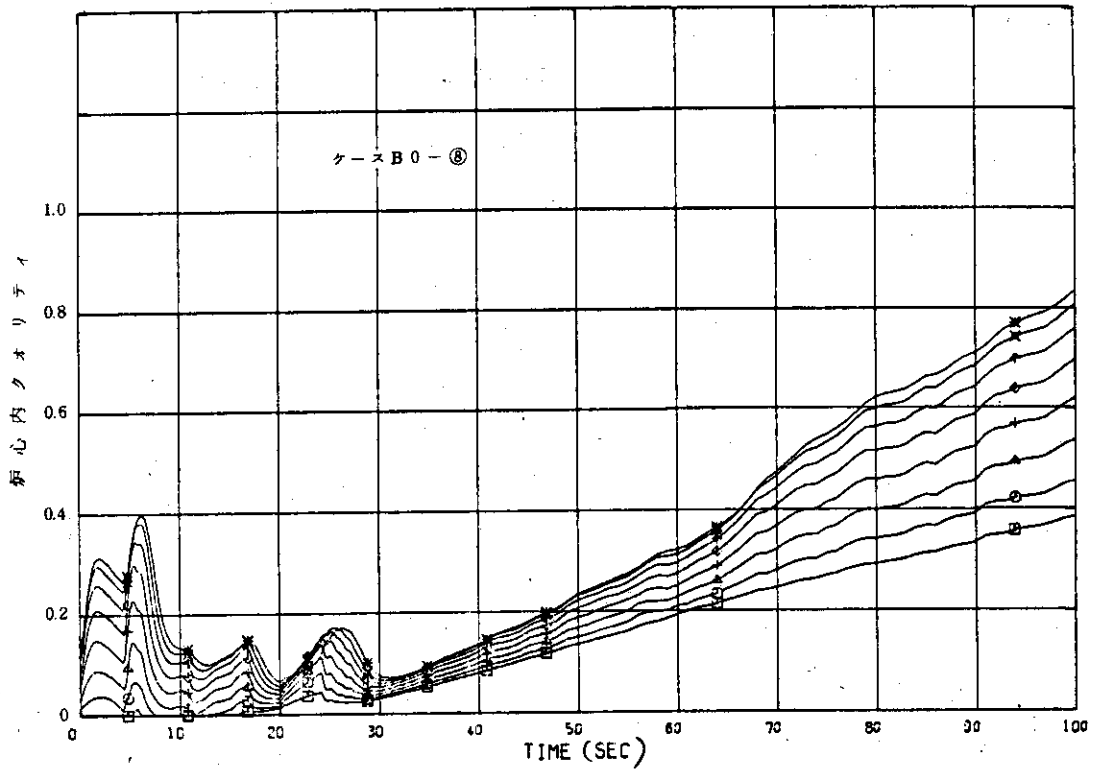


Fig. A. 48 ケースB0-⑧の炉心内クオリティ

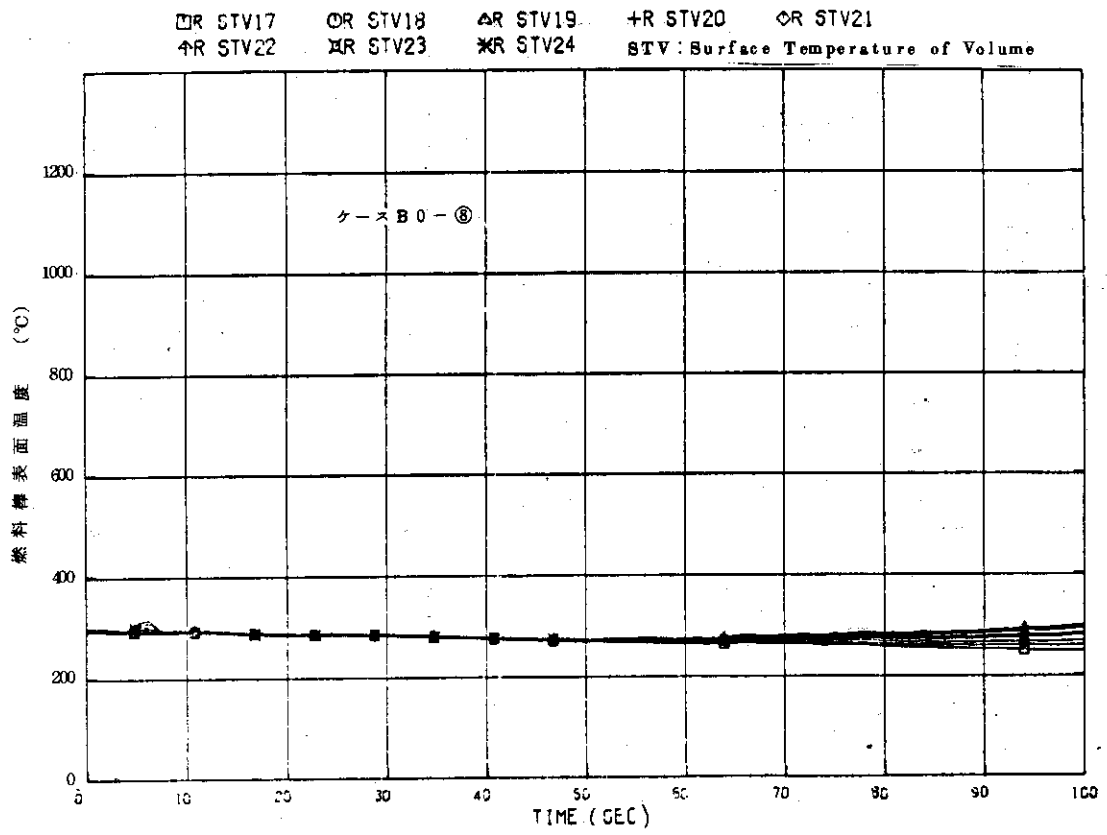


Fig. A.49 ケース B0-8 の燃料棒被ふく管表面温度

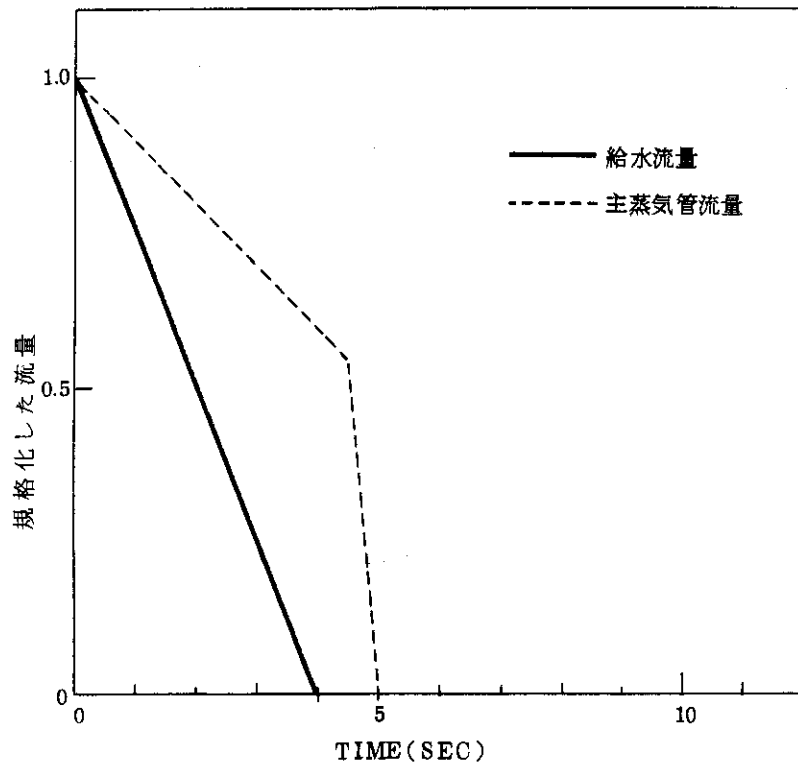


Fig. A. 50 給水流量と主蒸気管流量の変化

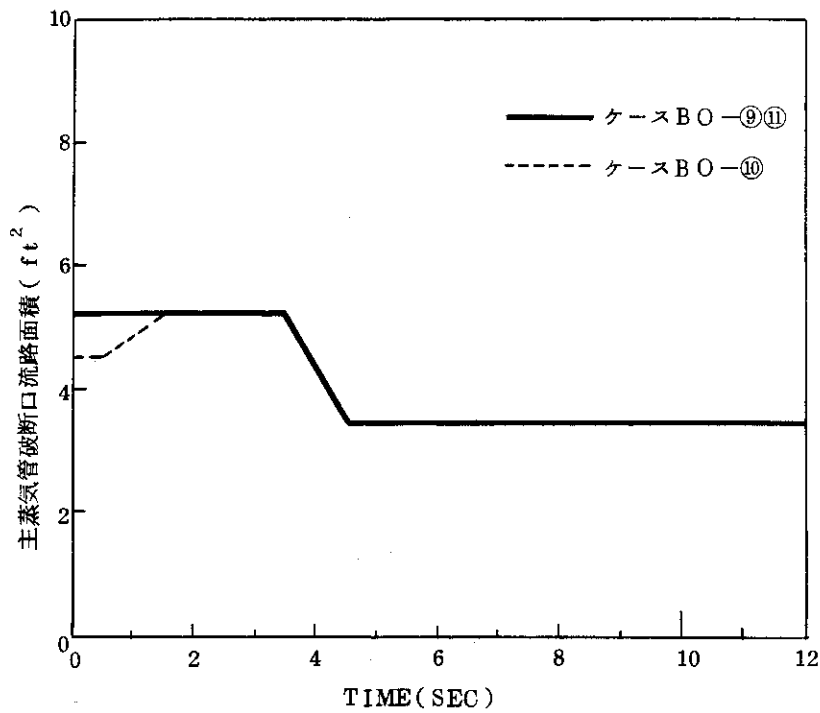


Fig. A. 51 ケースBO-⑨~⑩の主蒸気管流路面積

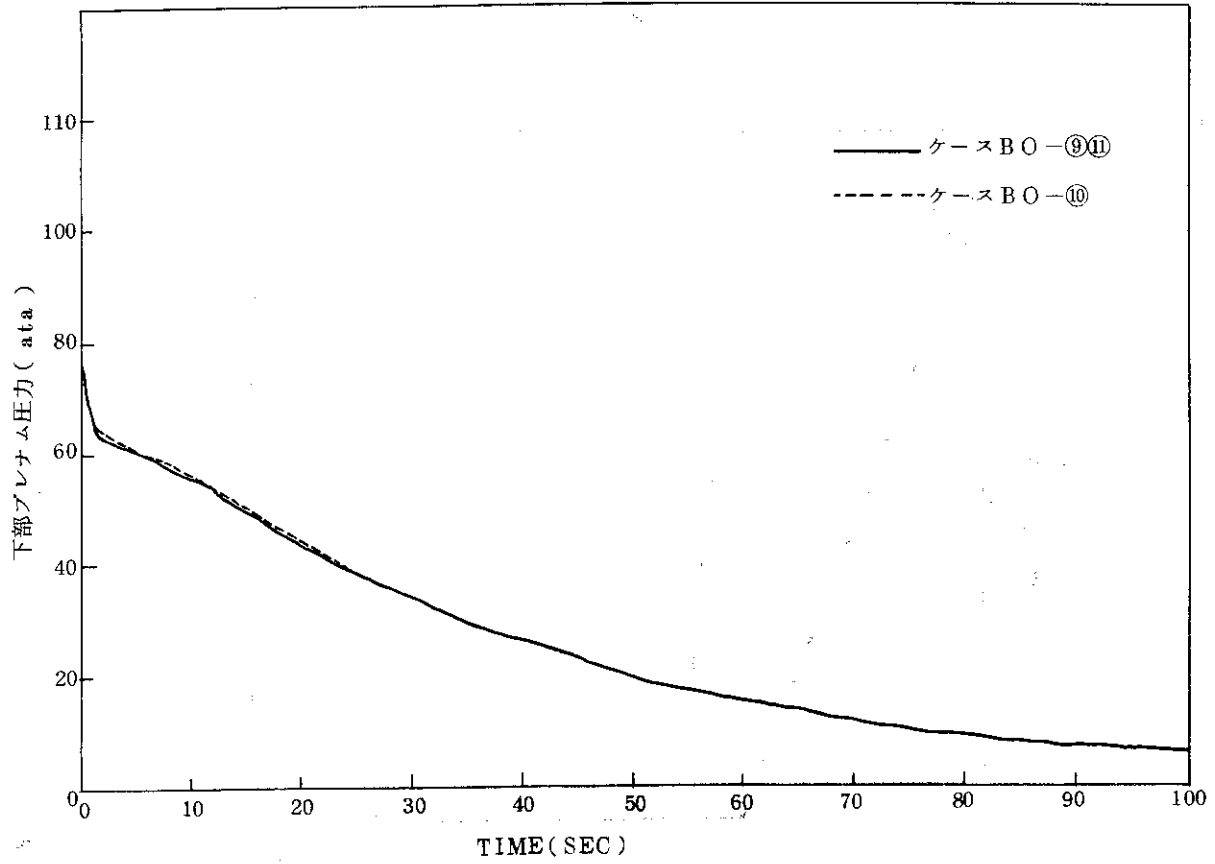


Fig. A. 52 ケースBO-⑨~⑪の下部プレナム圧力

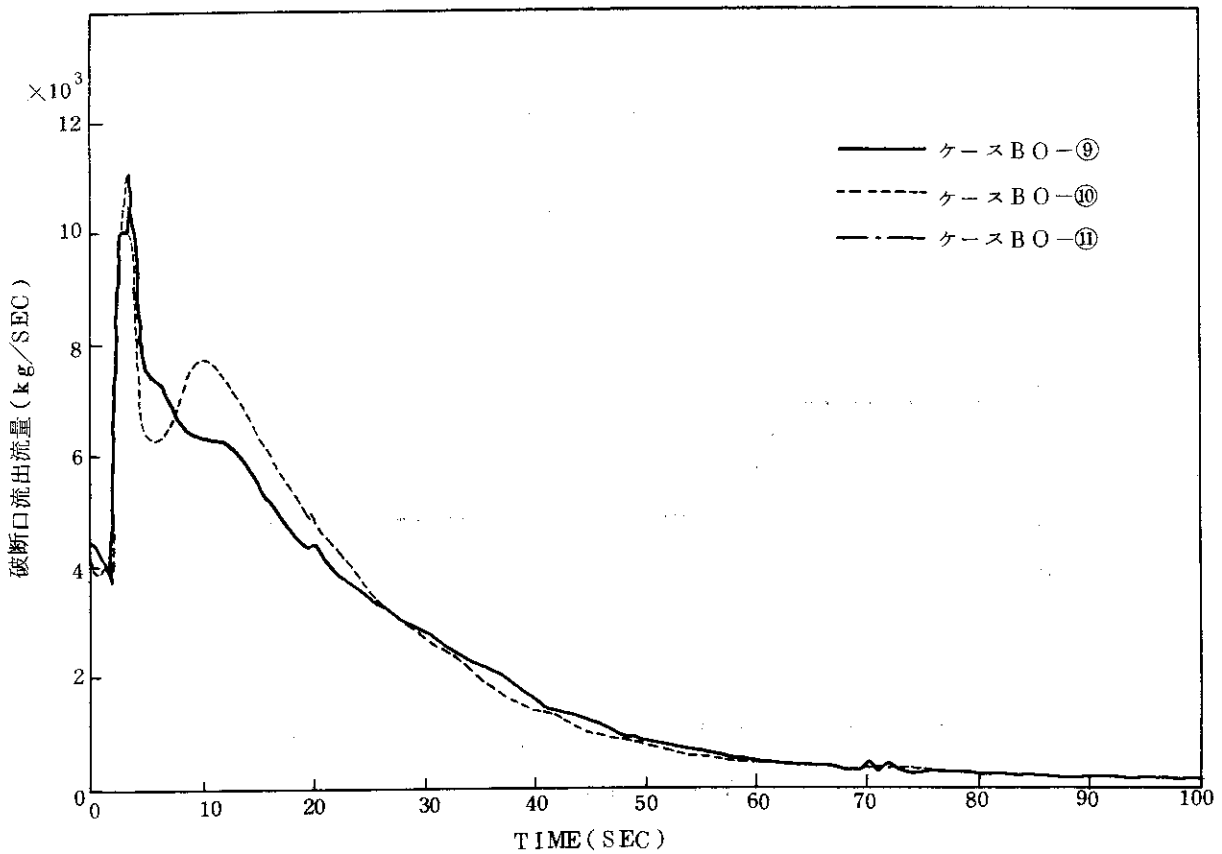


Fig. A. 53 ケースBO-⑨~⑪の流出流量

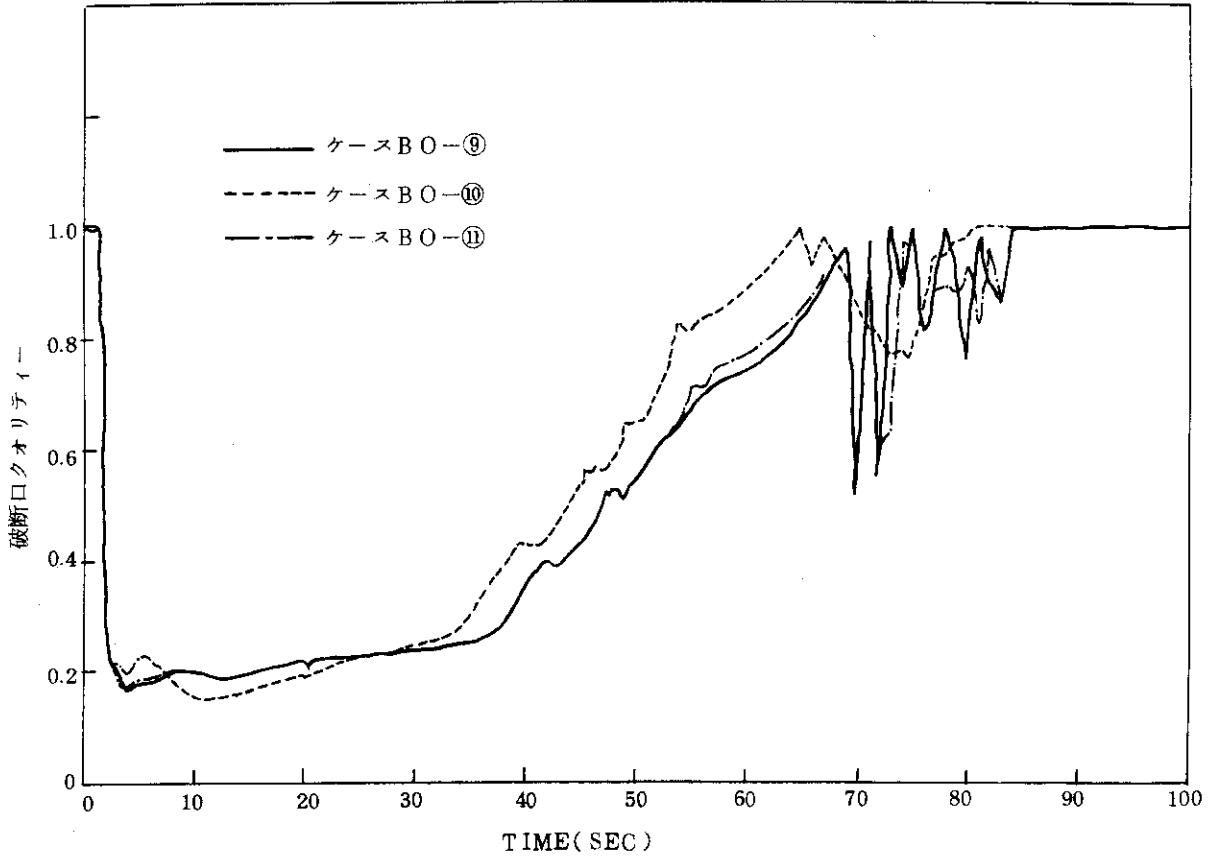


Fig. A. 54 ケースBO-⑨~⑪の破断口クオリティ

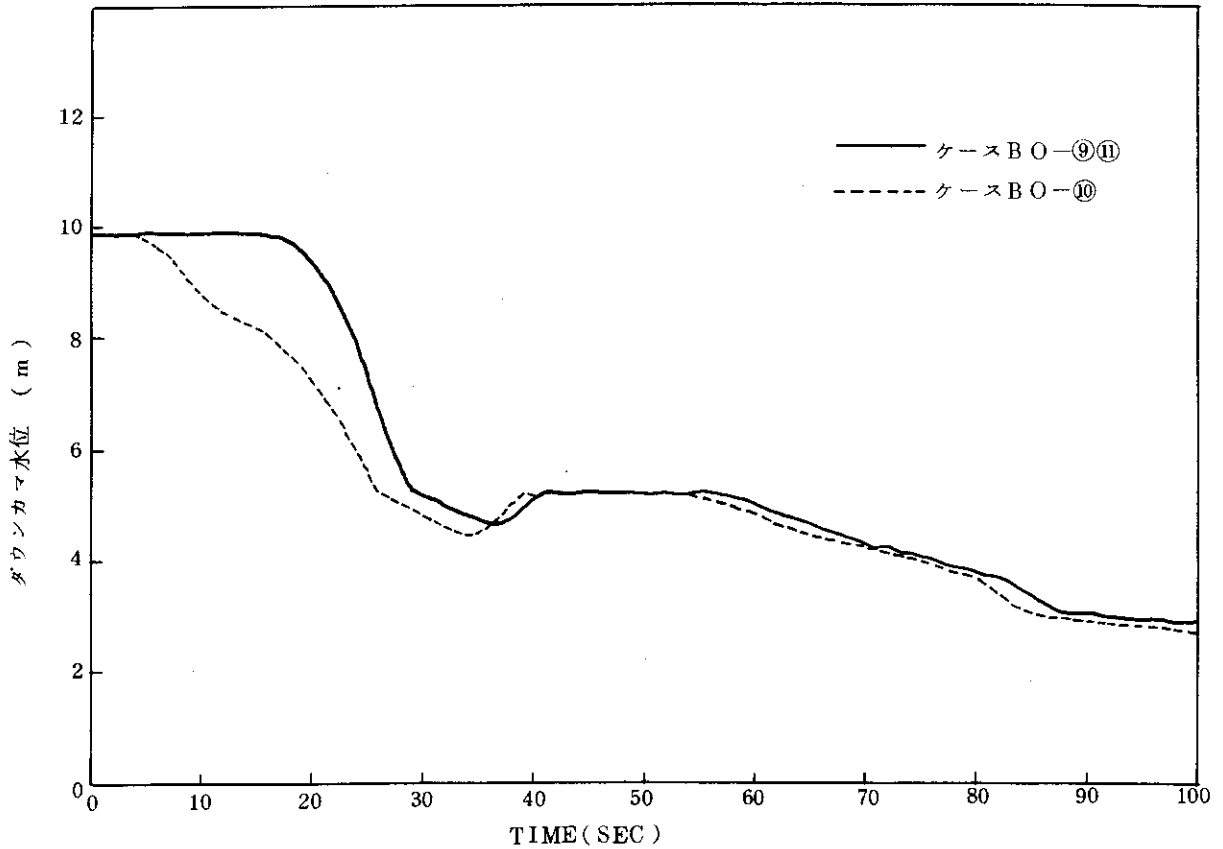


Fig. A. 55 ケースBO-⑨~⑪のダウンカマ水位

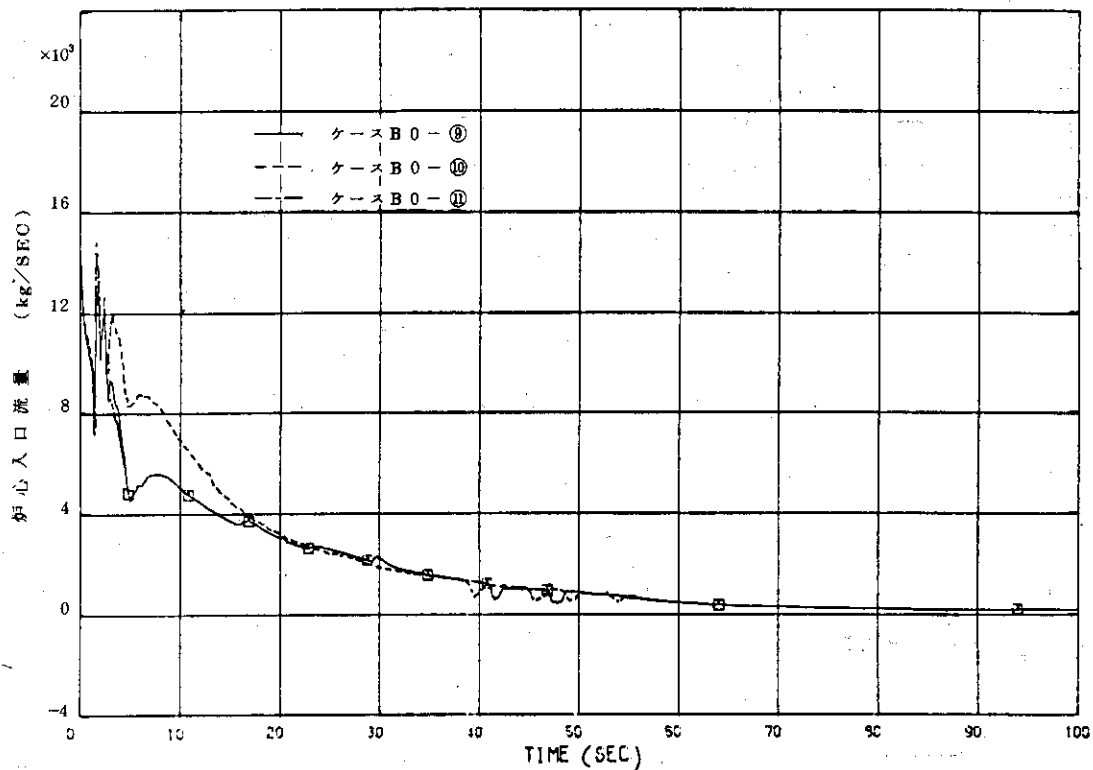


Fig. A. 56 ケース B0-⑨～⑪の炉心入口流量

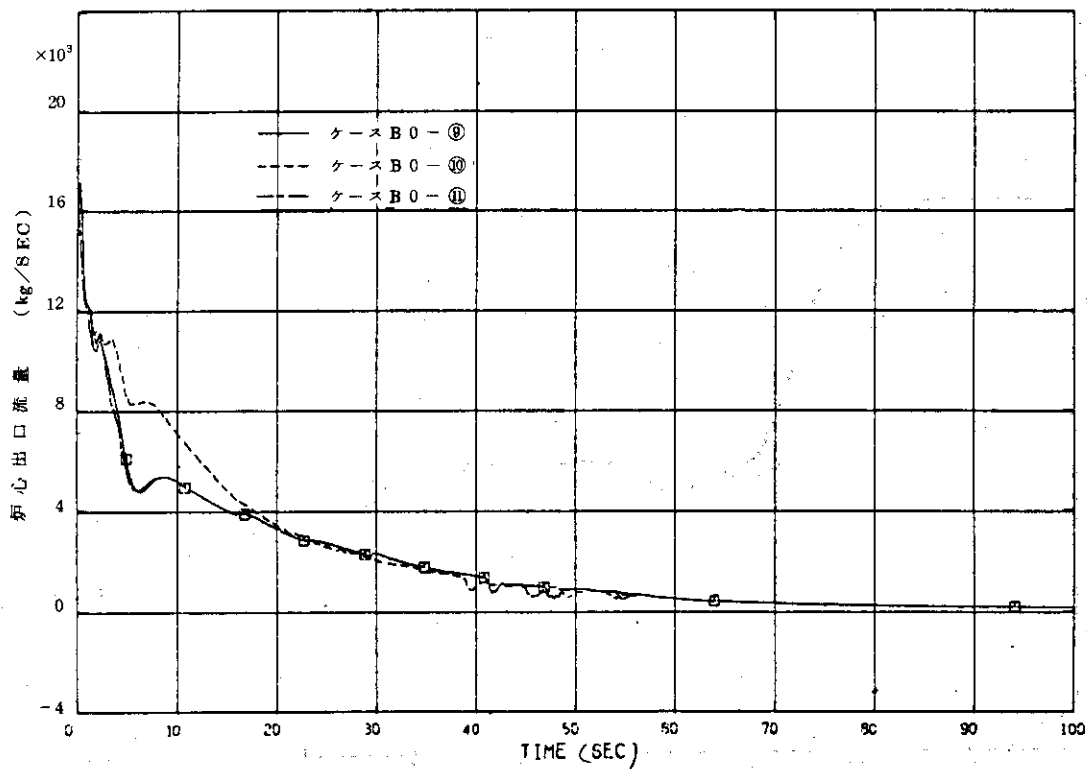
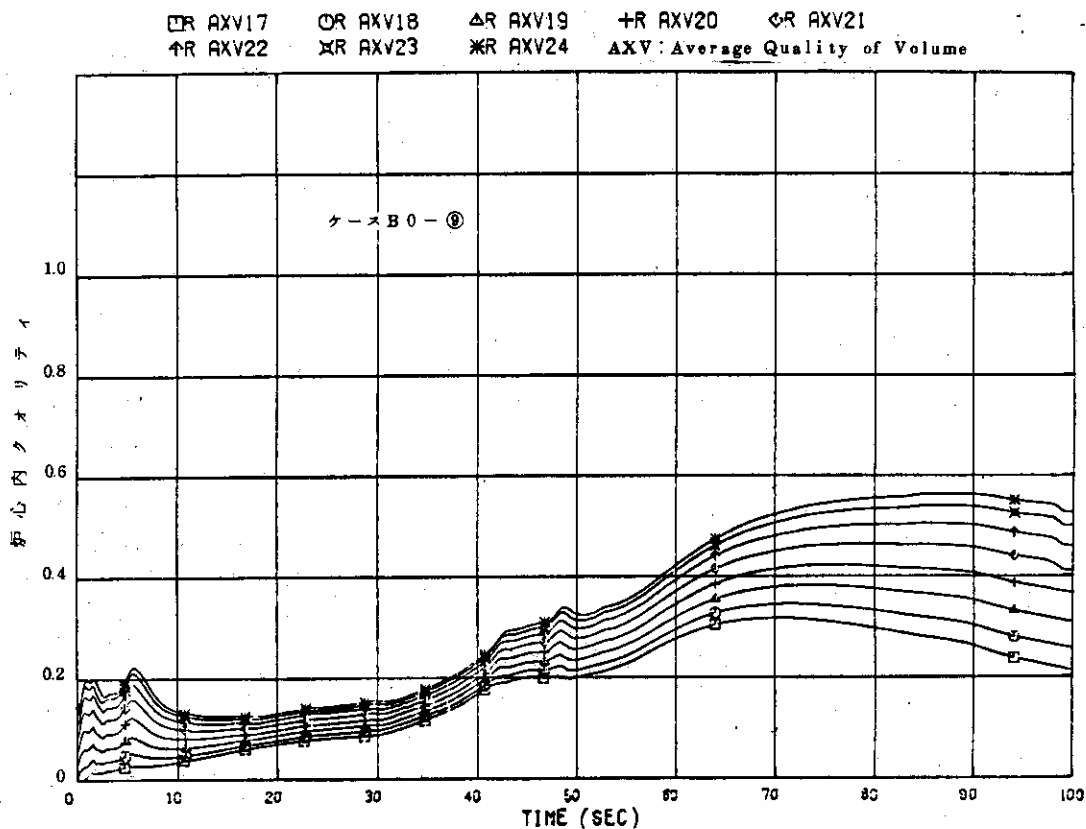


Fig. A. 57 ケース B0-⑨～⑪の炉心出口流量



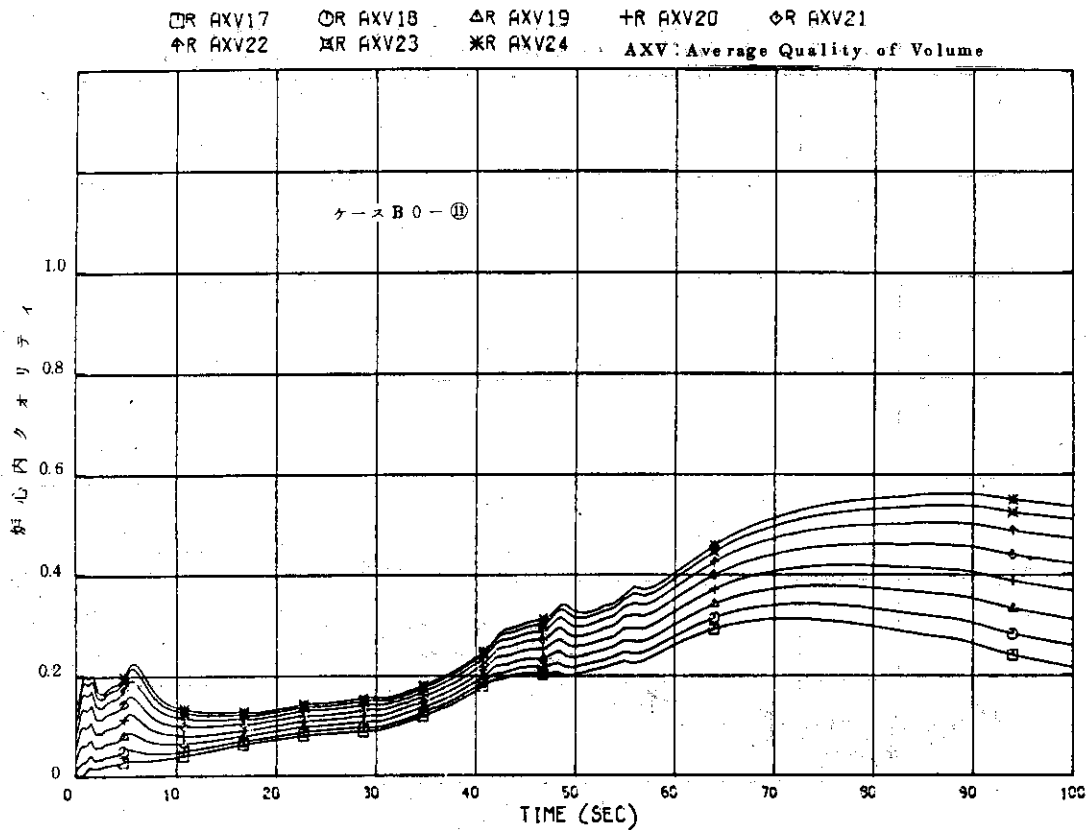


Fig. A. 60 ケース B 0 - ⑪ の炉心内クオリティ

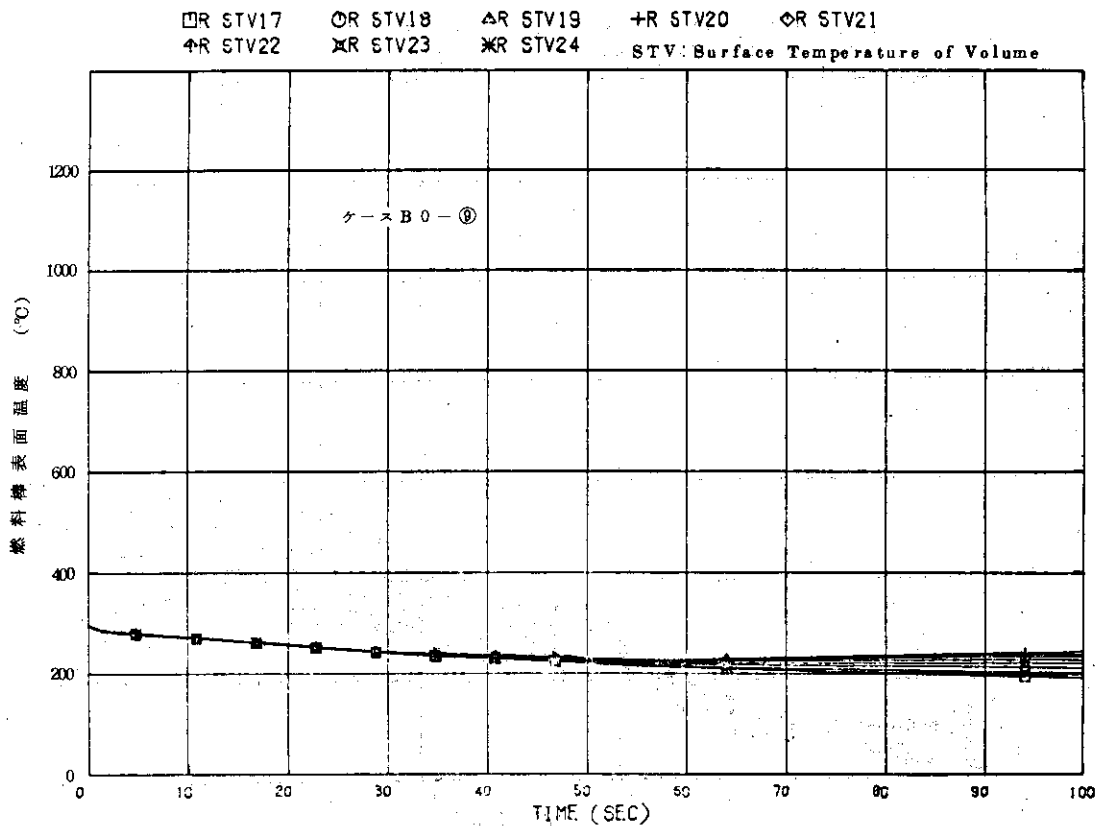


Fig. A. 61 ケース B 0 - ⑨ の燃料棒被ふく管表面温度

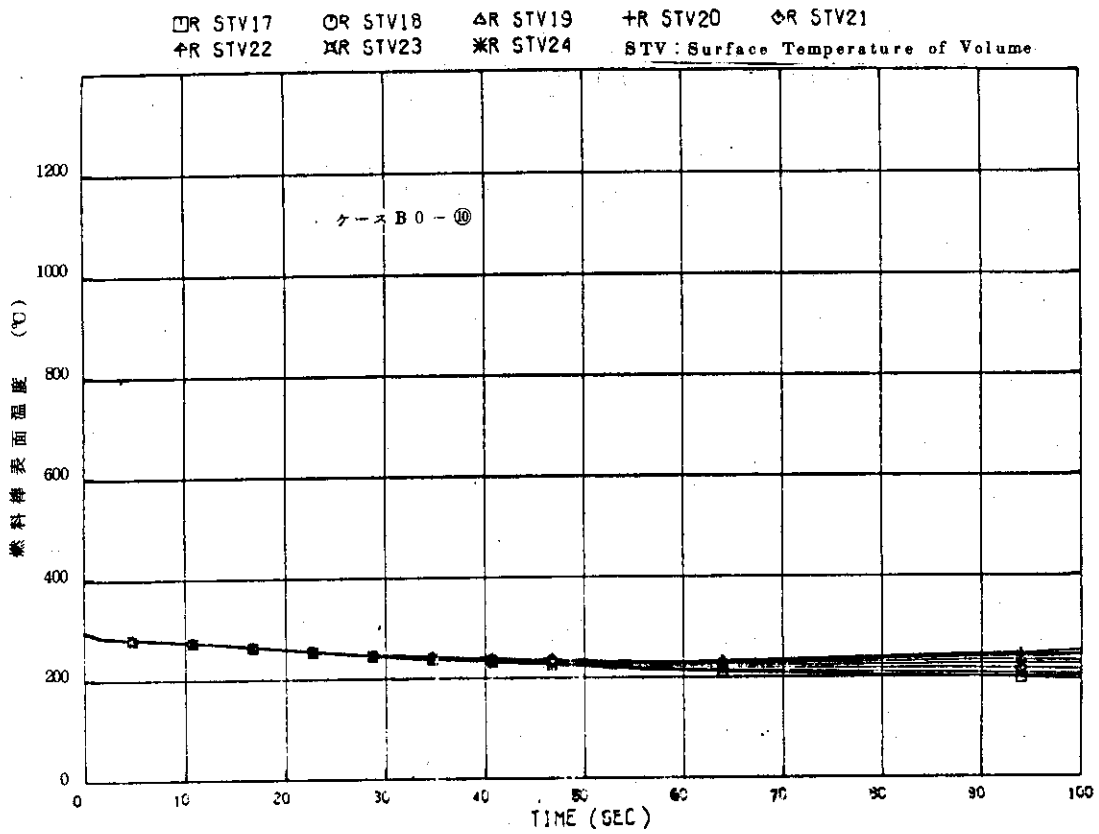


Fig. A. 62 ケース B 0 - ⑩の燃料棒被ふく管表面温度

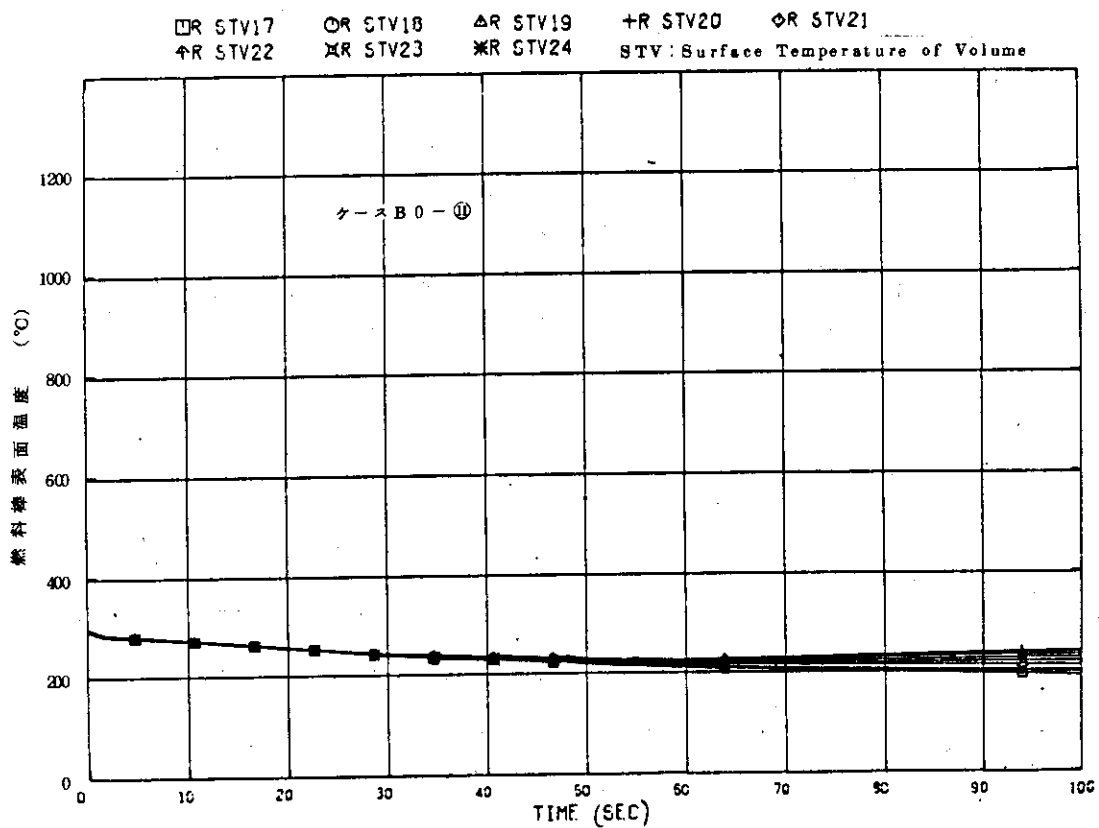


Fig. A. 63 ケース B 0 - ⑪の燃料棒被ふく管表面温度

APPENDIX B BWR/6 (251/848) 資料⁽³⁾

ROSA III 実験装置のモデルとなった BWR の主要諸元を以下に示す。モデルとなったのは、BWR (251-848) である。

Table B-1	熱流動的設計値
Table B-2	BWR/6 形状データ
Fig. B-1	PV 及び再循環系の流れ
Table B-3	PV 及び再循環系の各特性値 (Fig. B-1 の説明)
Fig. B-2	BWR/6 定格出力における熱バランス
Table B-4	BWR/6 圧力容器内差圧
Fig. B-3	BWR/6 再循環ラインの概要
Table B-5	BWR/6 再循環系設計値
Fig. B-4	BWR/6 炉心配置図
Fig. B-5	BWR/6 燃料集合体概要
Fig. B-6	BWR/6 燃料集合体断面の各サイズ
Fig. B-7	BWR/6 制御棒概要
Fig. B-8	BWR/6 炉心下部流れ
Fig. B-9	BWR/6 ジェットポンプ概観
Fig. B-10	BWR/6 ジェットポンプの作動原理
Fig. B-11	BWR/6 スチームセパレーターの流れ
Fig. B-12	BWR/6 スチームドレイヤー概観
Table B-6	HPCS の設計値 (ROSA III の値も示す)
Table B-7	LPCI の設計値 (ROSA III の値も示す)
Table B-8	LPCS の設計値 (ROSA III の値も示す)
Fig. B-13	BWR/6 ECCS 電源供給系 BWR/6 ECCS ラインのパイプサイズ
Fig. B-14	BWR/6 HPCS の流量
Fig. B-15	BWR/6 LPCI の流量
Fig. B-16	BWR/6 LPCS の流量
Fig. B-17	GE 社が使用しているボリューム図
Fig. B-18	初期炉心と末期炉心の軸方向出力相対値の比較
Fig. B-19	主蒸気ライン

Table B-1 BWR/6の熱流動の設計値

251-848			
<u>General Operating Conditions</u>			
Rated design thermal output, Mwt	3800	Core average void fraction, active coolant	0.412
Power level for engineered safety features, Mwt	102% rated	Maximum fuel temperature, °F	3031
Steam flow rate, at 420 °F final feedwater temperature, millions lb/hr	16.351	Active coolant flow area per assembly, in ²	15.50
Core coolant flow rate, millions lb/hr	122.5	Core average inlet velocity, ft/sec	7.2
Feedwater flow rate, millions lb/hr	16.308	Maximum inlet velocity, ft/sec	7.6
System pressure, nominal in steam dome, psia	1040	Total core pressure drop, psi	25.2
System pressure, nominal Core design, psia	1055	Core support plate pressure drop, psi	20.8
Coolant saturation temperature at core design pressure, °F	551.1	Average orifice pressure drop	
Average power density, KW/liter	51.3	Central region, psi	8.7
Specific power kw/kg (U total)	23.7	Peripheral region, psi	17.5
Maximum thermal output, kw/ft	12.3	Maximum channel pressure loading, psi	13.7
Average thermal output, kw/ft	5.4	Average heat flux, Btu/hr-sq ft	159,550
Core total heat transfer area, ft ²	85,042	M CPR of reference design thermal output boiling transition design correlation, reference 1	1.24
Maximum heat flux, Btu/hr-sq ft	324,700	Core inlet enthalpy at 420 °F FFWT, Btu/lb	528.1
Average heat flux, Btu/hr-sq ft	146,260	Core inlet temperature, at 420 °F FFWT, °F	533.2
M CPR of reference design thermal output boiling transition design correlation, reference 1	≥1.24	Core maximum exit voids within assemblies, %	76
Core inlet enthalpy, at 420 °F FFWT, Btu/lb	529.9	Core average void fraction, active coolant	0.427
Core inlet temperature, at 420 °F FFWT, °F	534.6	Maximum Fuel temperature, °F	3337
Core maximum exit voids within assemblies, %	75	Active coolant flow area per assembly, in ²	15.50
Core support plate pressure drop, psi	21.4	Core average inlet velocity, ft/sec	7.2
Average orifice pressure drop		Maximum inlet velocity, ft/sec	7.6
Central region, psi	8.6	Total core pressure drop, psi	25.9
Peripheral region, psi	17.1	<u>Design Power Peaking Factor</u>	
Maximum channel pressure loading, psi	14.5	Maximum relative assembly power	1.40
		Local peaking factor	1.13
		Axial peaking factor	1.40
		Cross peaking factor	1.96
		Total peaking factor	2.22

Table B-2 BWR/6形状データ

	Flow Path Length (in.)	Height and Liquid Level (in.)	Elevation of Bottom of Each volume* (in.)	Minimum Flow Areas (sq ft)
A. Lower Plenum	216.3	216.3 216.3	-152.5	105.1
B. Core	164.4	164.4 164.4	63.8	153.0 includes bypass
C. Upper Plenum and Separators	172.3	172.3 172.3	228.2	66.35
D. Dome (Above Normal water Level)	325.3	325.3 0	400.5	343.6
E. Downcomer Area	318.3	318.3 318.3	-12.0	69.3
F. Recirculation Loops and Jet Pumps (one loop)		401.5 401.5	-394.5	1449 in ²

*Reference point is recirculation nozzle outlet.

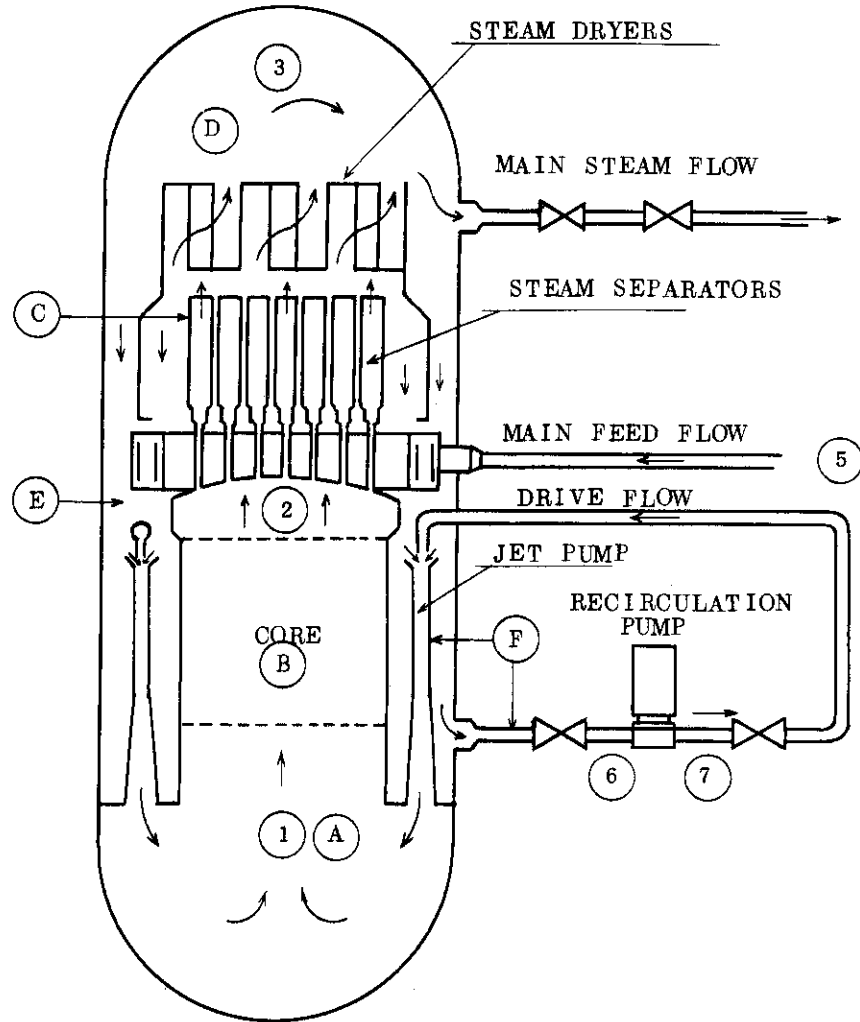
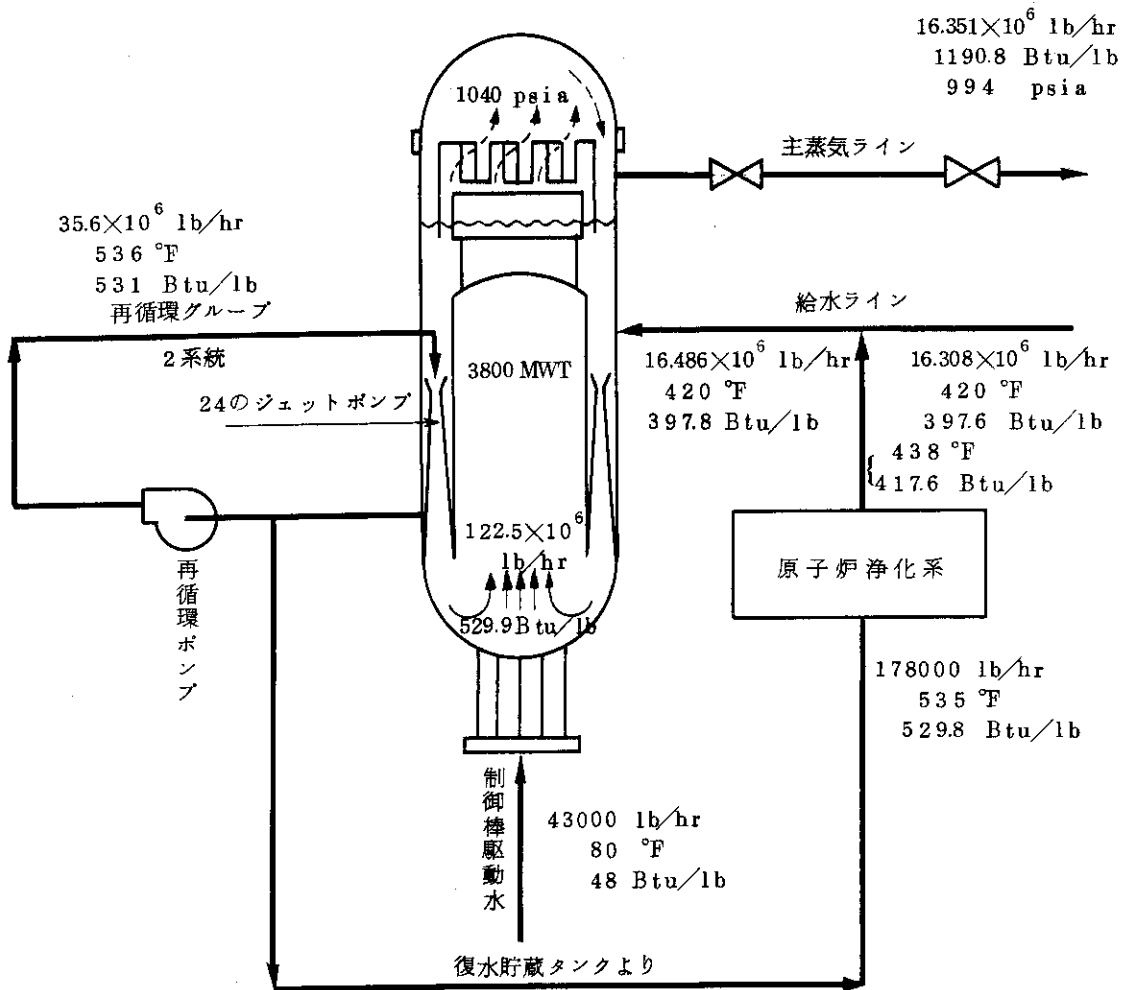


Fig. B・1 PV及び再循環系の流れ

Table B-3 PV及び再循環系の各特性値 (Fig. B-1の説明)

	圧力 (psia)	流量 (lb/hr)	温度 (°F)	エンタルピー Btu/lb
① 炉心入口	1075	122.5×10^6	535	530
② 炉心出口	1049	122.5×10^6	560	636
③ スチームセパレーター出口 (スチームドーム)	1040	16.351×10^6	549	1191
④ 主蒸気ライン (第2隔離弁)	994	16.351×10^6	543	1191
⑤ 給水入口	1065	16.351×10^6	420	398
⑥ 再循環ポンプ吸込側	1039	35.6×10^6	535	530
⑦ 再循環ポンプ吐出側	1305	35.6×10^6	536	531

	流体体積 (ft ³)
Ⓐ 下部アレナム	4338
Ⓑ 炉心	2111
Ⓒ 上部アレナムとスチームセパレーター	2843
① 蒸気ドーム (基準水位より上部)	7258
Ⓔ ダウンカマ	4349
Ⓕ 再循環ループとジェットポンプ	1046



炉心熱出力	3800 MWT
ポンプによる加熱	12.5 MWT
原子炉浄化系によるロス	- 5.9 MWT
その他のロス	- 1.1 MWT
	3805.5 MWT

Fig. B-2 BWR/6の定格出力における熱バランス

Table B-4 BWR / 6 圧力容器内差圧

Reactor Component	Initial Steady State Value (psia)
Core Plate and Guide Tube	22.0
Shroud Support Ring and Lower Support	25.8
Upper Shroud and Shroud Head	3.7
Channel Box	12.7
Dryer	0.3

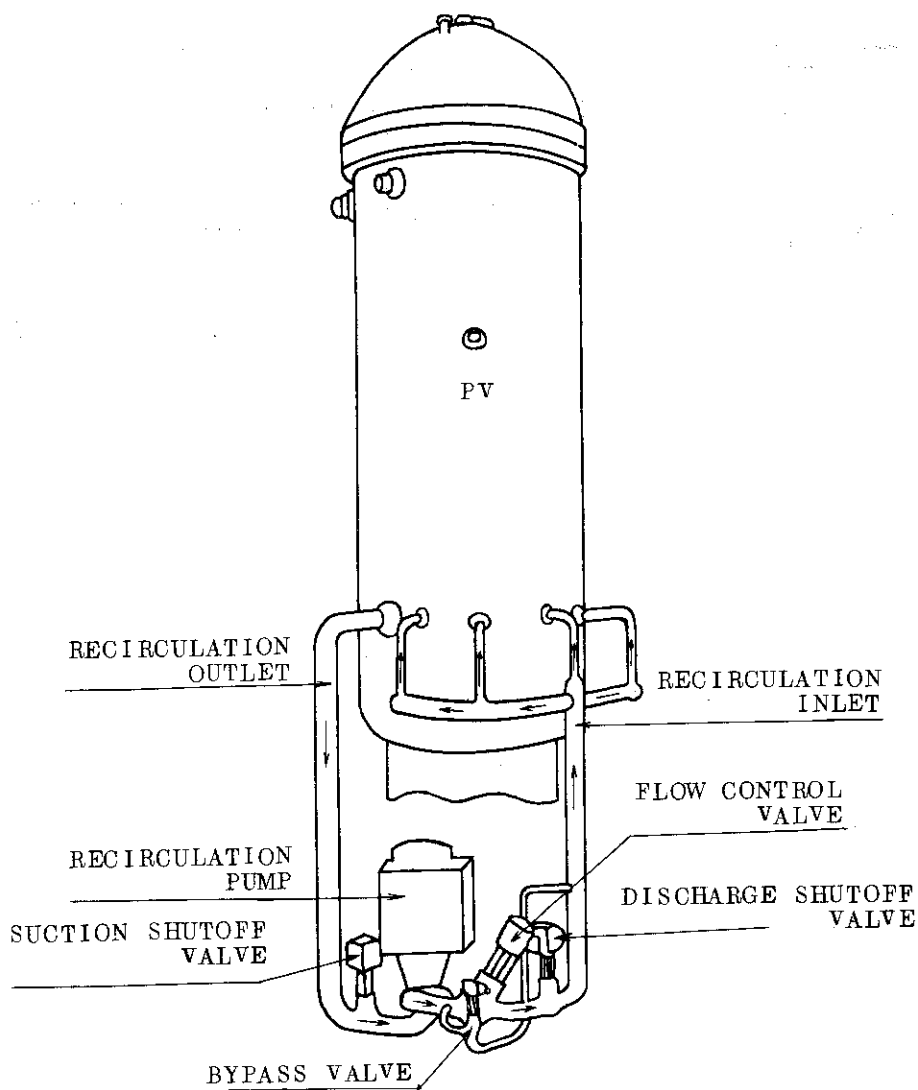


Fig. B-3 BWR / 6 再循環ラインの概要

Table B-5 BWR/6再循環系設計値

<u>External Loops</u>	
Number of loops	2
Pump Sizes (nominal o.d.):	
Pump suction, in.	24
Pump discharge, in.	24
Discharge manifold, in.	16
Recirculation inlet line, in.	12
Recirculation bypass line, in.	10
Design Pressure (psig)/Design Temperature (°F):	
Suction piping and valve up to and including pump suction nozzle	1250/575
Pump, discharge valves, and piping between	1650/575
Piping after discharge blocking valve up to vessel	1550/575
Pump auxiliary piping and cooling water piping	150/212
Vessel bottom drain	1275/575
<u>Operation at Rated Conditions</u>	
Recirculation Pump:	
Flow, gpm	43,100
Flow, lb/hr	17.8×10^6
Total developed head, ft	810
Suction pressure (static), psia	1039
Required NPSH, ft	115
Water temperature (max), °F	535
Pump brake EP (min)	8370
Flow velocity at pump suction (approximate), fps	41.4
Pump Motor:	
Voltage rating	6600
Speed, RPM	1780
Motor rating (hp)	8900
Phase	3
Frequency	60Hz
Motor rotor inertia (ft ²)	21,500
Jet pumps:	
Number	24
Total jet pump flow, lb/hr	122.5×10^6
Throat i.d., in.	6.40
Diffuser i.d., in.	14.7
Nozzle i.d. (five each), in.	1.24
Diffuser exit velocity, fps	25.5
Jet pump head, ft	88.3
Flow Control Valve:	
Type	Ball
Material	Austenitic S/S
Type actuation	Hydraulic
Failure mode (on loss of power or control signal)	As is
Valve wide open C _v (min)	8310
Valve opening and closing rate (min/max) percent of max stroke per second	10 to 11
Valve size diameter, in.	24
Recirculation Loop Block Valve:	
Type	Gate valve
Actuator	Motor
Material	Austenitic S/S
Shutoff leakage, cc/in./hr	2
Valve size diameter, in.	24
Recirculation Loop Bypass Valve:	
Type	Right angle
Actuator	Motor
Material	Austenitic S/S
Shutoff leakage, cc/in./hr	10
Valve size diameter, in.	10

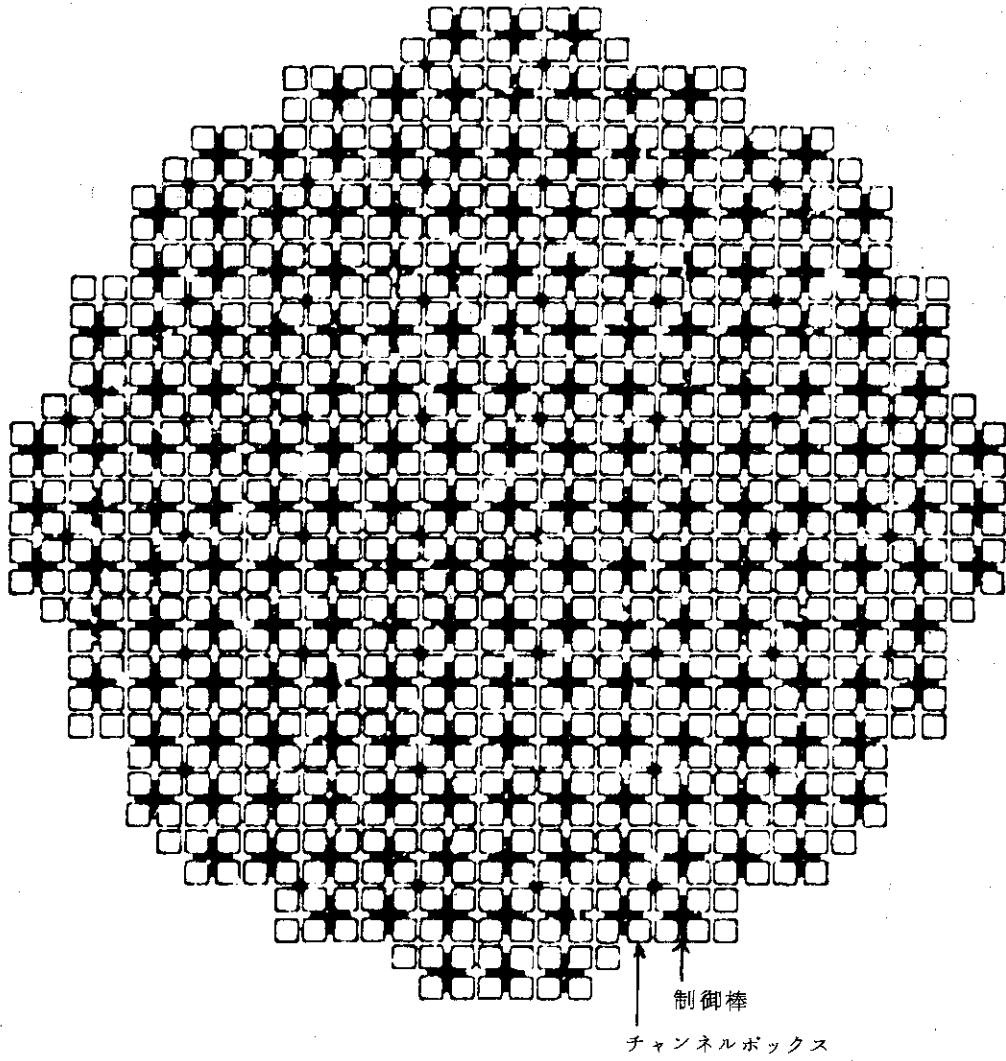


Fig. B. 4 BWR/6 炉心配置図

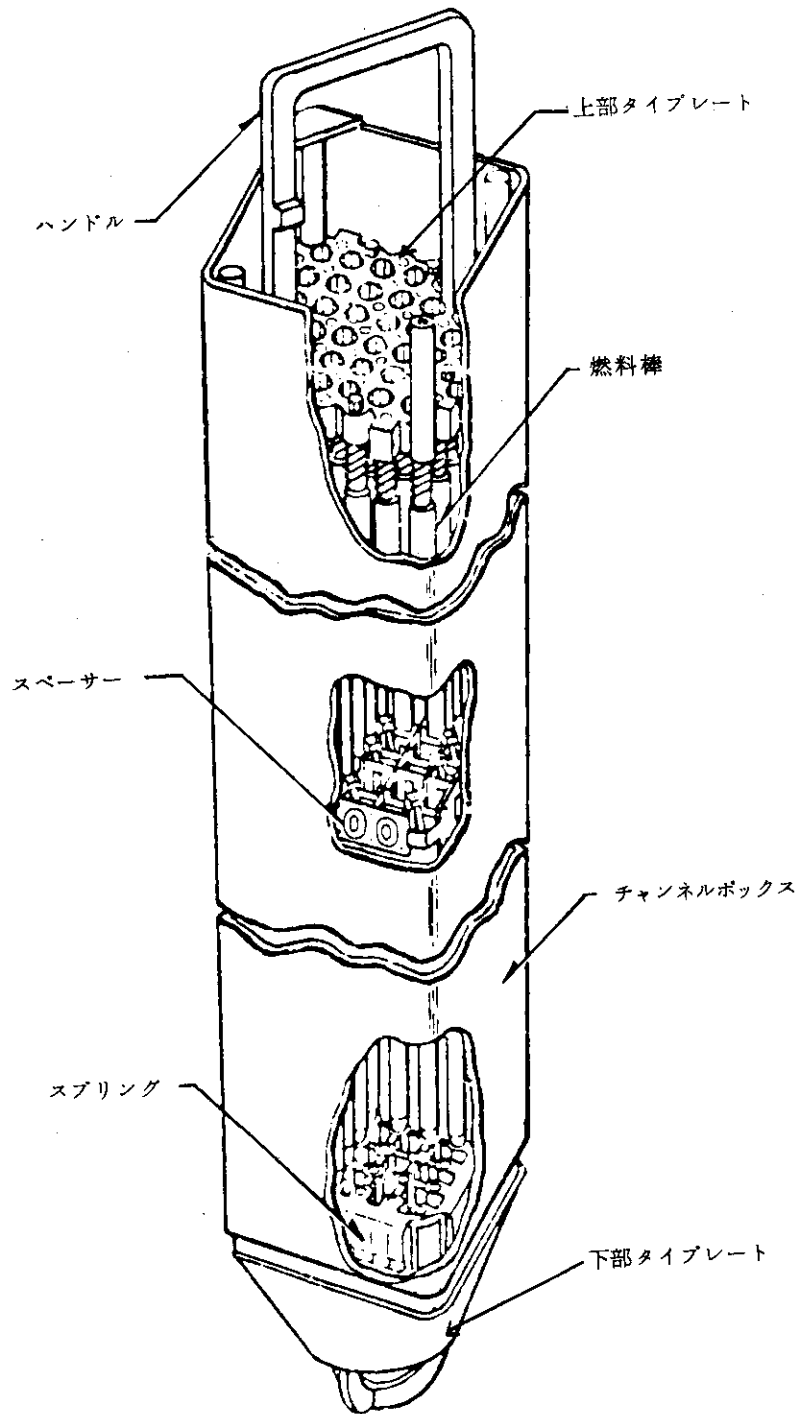


Fig. B. 5 BWR/6 燃料集合体

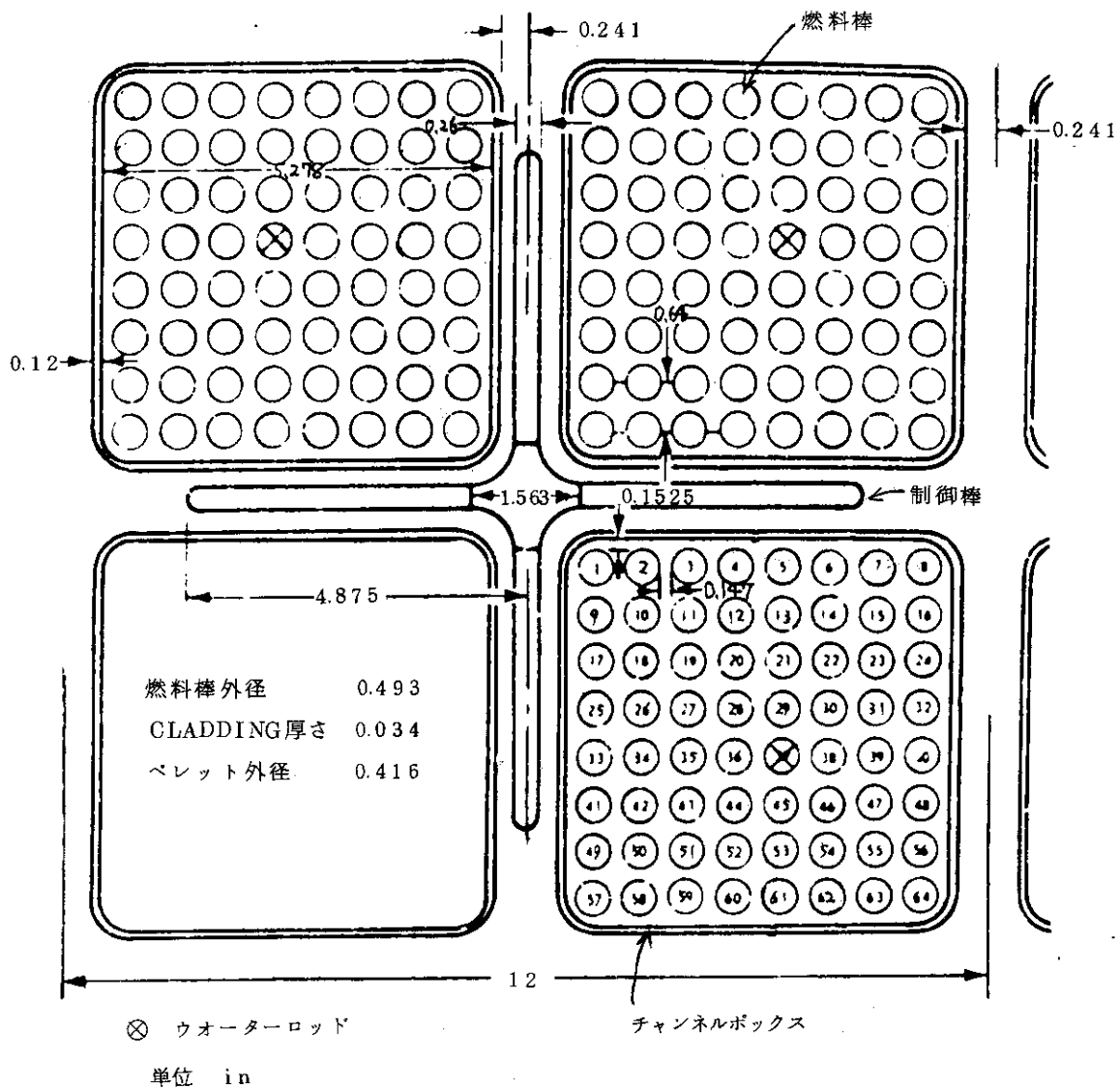


Fig. B. 6 BWR/6 燃料集合体断面

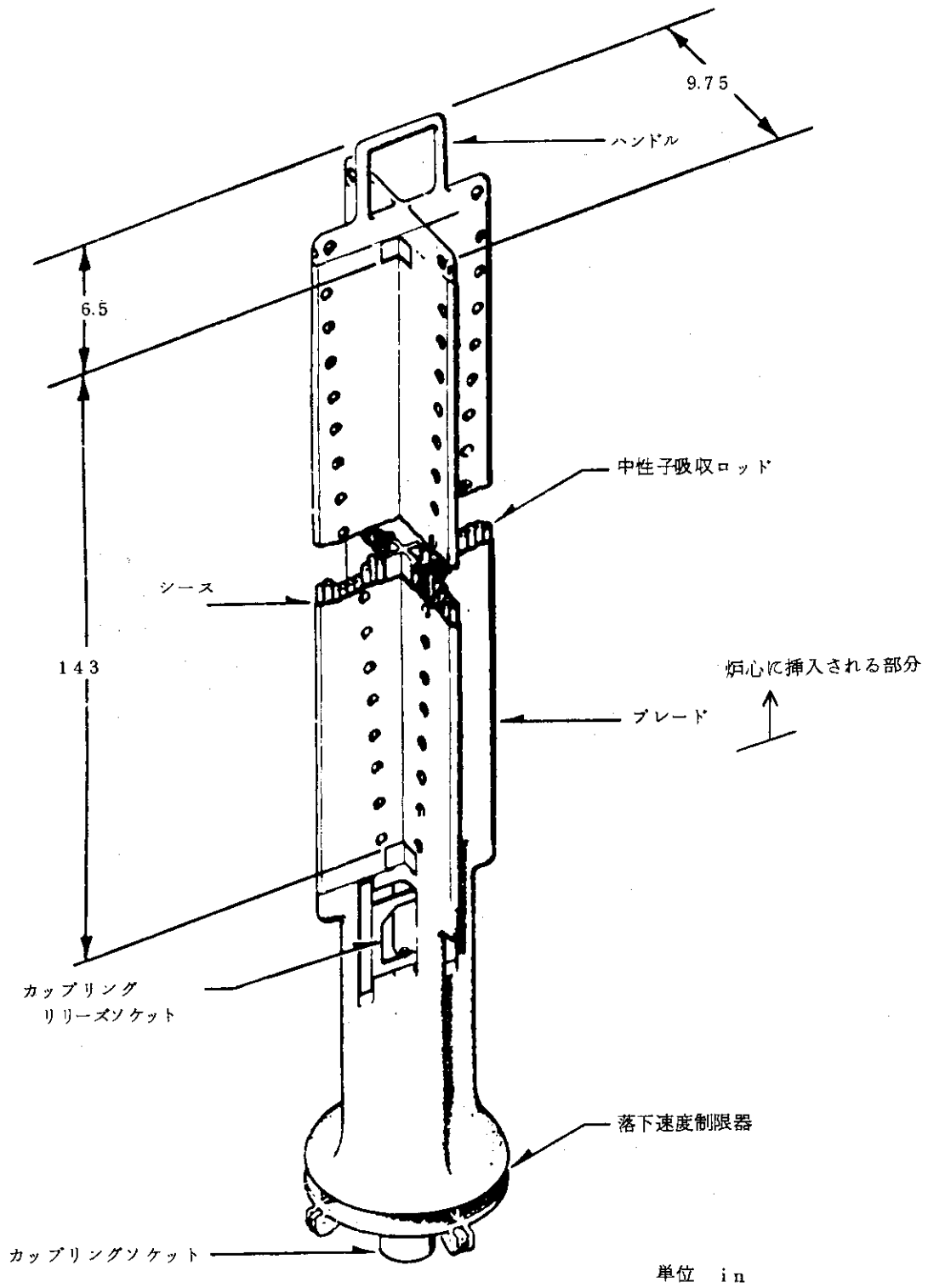


Fig. B. 7 BWR/6 制御棒

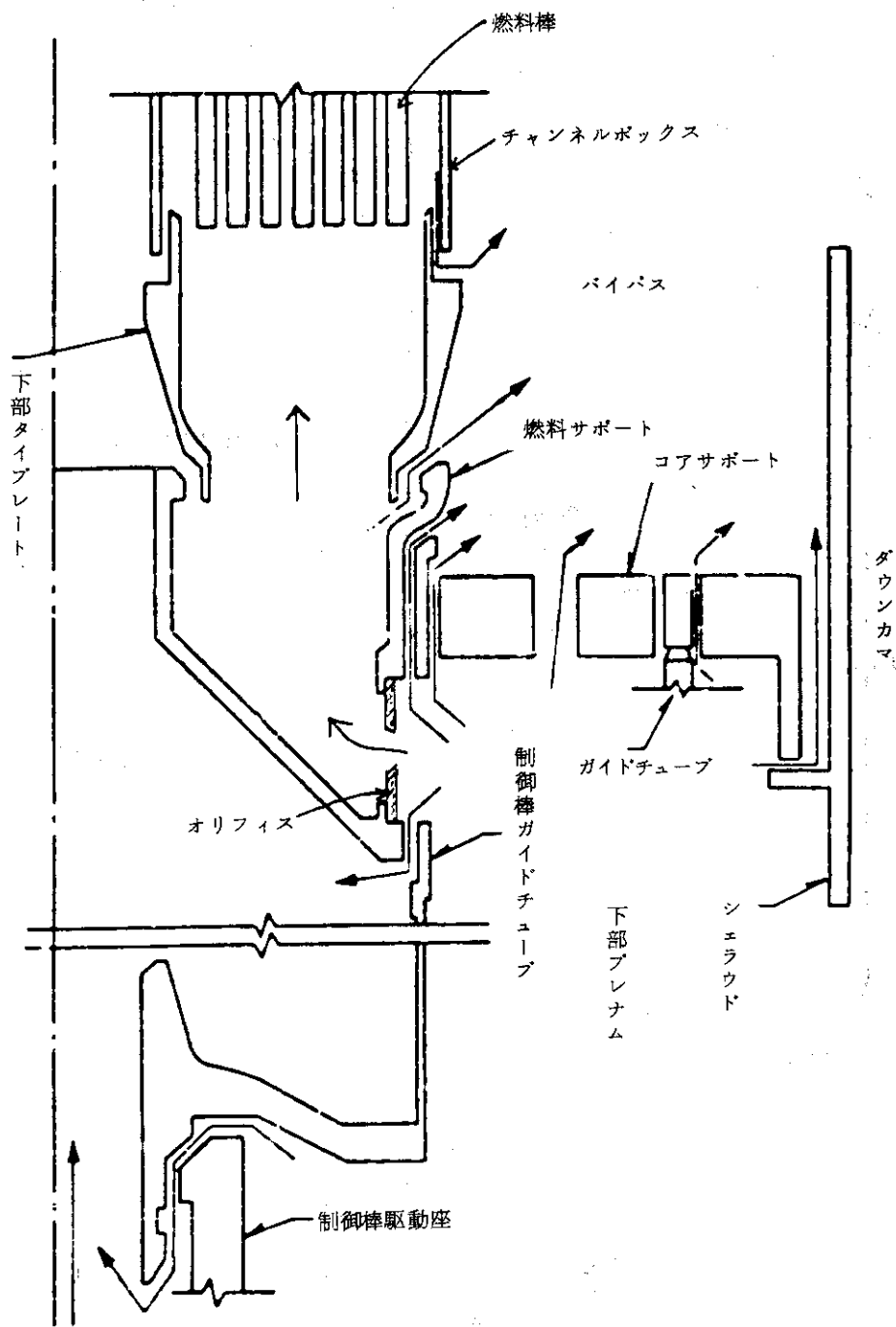


Fig. B. 8 BWR/6 炉心下部の流れ

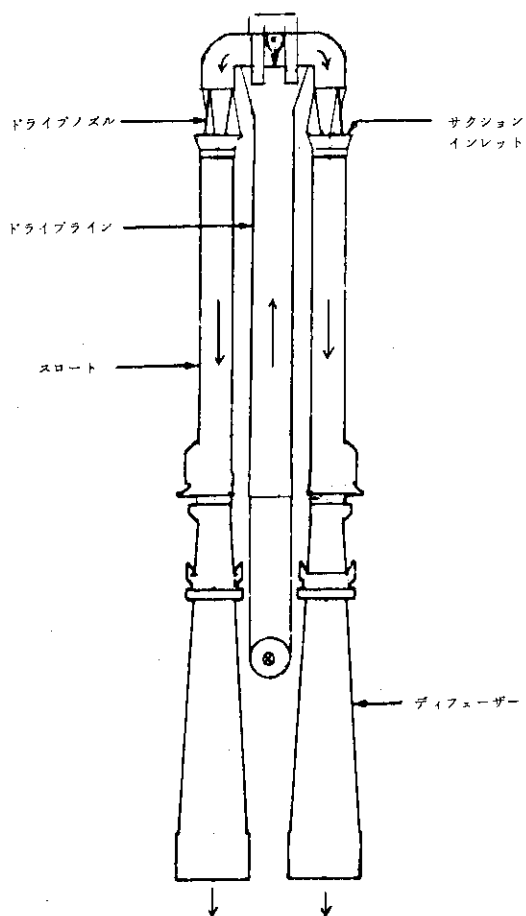


Fig. B. 9 BWR/6 ジェットポンプ概観

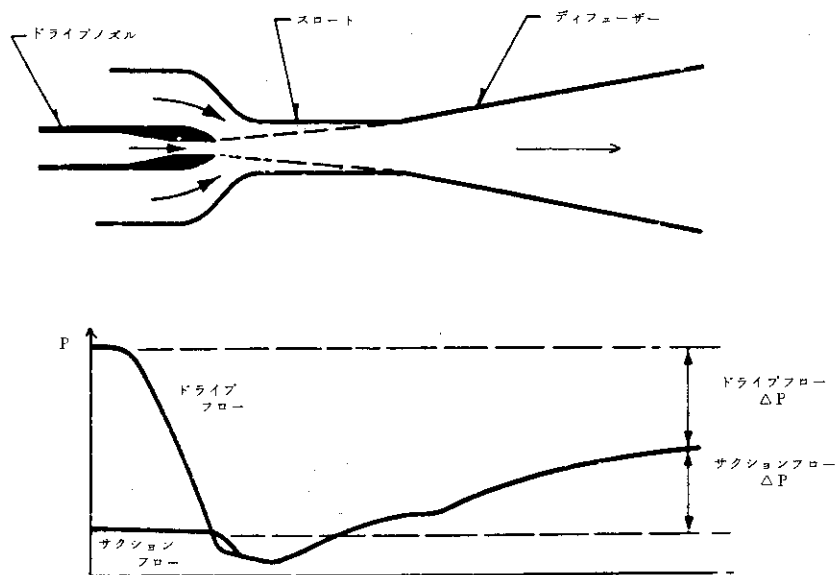


Fig. B. 10 BWR/6 ジェットポンプの作動原理

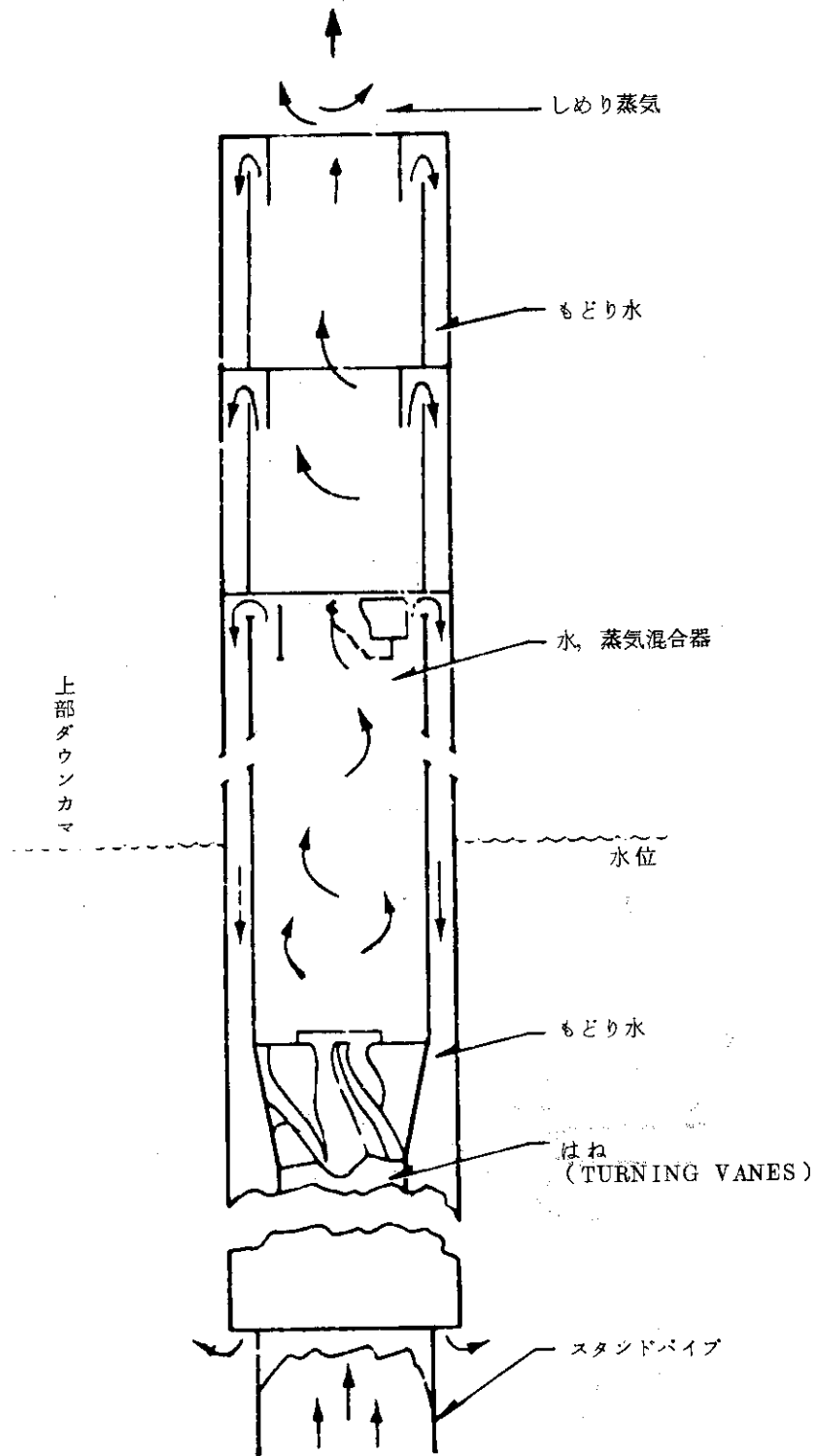


Fig. B. 11 BWR/6 スチームセパレーター内の流れ

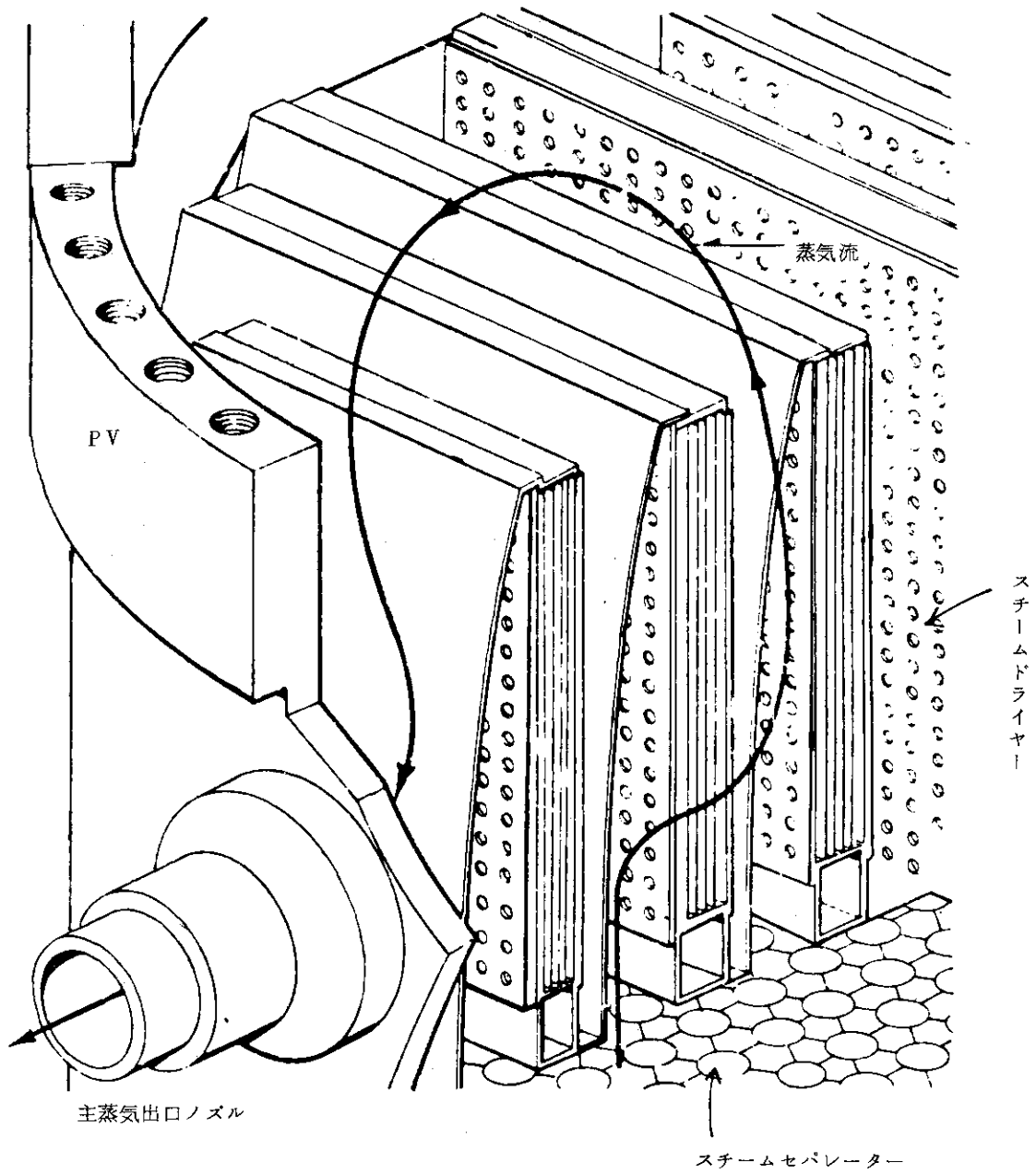


Fig. B. 12 BWR/6 スチームドライヤー

Table B-6 HPCSの設計値 (ROSA-IIIの値も示す)

	BWR/6	ROSA-III
系 統 数	1 (100%)	1
流 量	7000 GPM @ 200 psid 1650 GPM @ 1147 psid 9100 GPM (MAX値)	MAX値 26.4 GPM @ 126.4 psid 6.6 GPM @ 1176 psid 上記値の 1/3 まで制御可能である
水 温	80~160 °F	常 温
注 入 可 能 圧 力	0~1150 psig 200 psigで100%流量	
水 源	復水貯蔵タンク 1.7×10 ⁵ gallons 上記がなくなるとサブプレッションプール	HPCST (High Pressure Core Spray Tank) 有効水量 396 gallons
電 源	AC Bus No. 1 DG (ジーゼル発電機) C バッテリー C Fig. B-13 参照	
注 入 位 置	上部プレナムスプレーヘッド	上部プレナムスプレーヘッド 又は、下部プレナム
作 動 信 号	原子炉水位低 (レベル2) ドライウェル圧力高	PV水位低 タイマー マニュアルスイッチ
停 止 信 号	原子炉水位高	
注 入 ま だ の 時 間	作動信号からポンプが定格流量になるまで、最大27秒かかる。安全審査におけるDBAでは、上記時間と同時に注入が開始する。	

Table B-7 LPCIの設計値 (ROSA-IIIの値も示す)

	BWR/6	ROSA-III
系 統 数	3	1
流 量	7450GPM/1系統 @ 20 psid 8940GPM/1系統 (MAX値)	MAX値 1189GPM @ 294psid
水 温	80~160 °F	常 温
注 入 可能圧力	0~210 psig 21 psigで100%流量	
水 源	サブプレッションプール	LPCIT (Low Pressure Core Injection Tank) 有効水量 1783 gallons・
電 源	A系統 (熱交換器付き) AC Bus No.2 DG A バッテリー A	
	B系統 (熱交換器付き) 及び C系統 AC Bus No.3 DG B バッテリー B	
注 入 位 置	炉心上部スパージャー	炉心上部スパージャー 又は再循環ループポンプサクシオン 側 (各々のループ) 又は, 下部プレ ナム
作 動 信 号	LPCSと同じ	
停 止 信 号	なし (マニュアル)	
注 入 ま だ の 時 間	LPCSと同じ	

Table B-8 LPCSの設計値 (ROSA-IIIの値も示す)

	BWR/6	ROSA-III
系 統 数	1 (100%)	1
流 量	7000 GPM @122 psid 9100 GPM (MAX値)	MAX値 26.4 GPM @441 psid
水 温	80~160 °F	常 温
注 入 可 能 圧 力	0~289 psig 122 psigで100%流量	
水 源	サブプレッションプール	LPCST (Low Pressure Core Spray Tank) 有効水量 396 gallons
電 源	AC Bus No.2 DG A バッテリー A Fig. B.13参照	
注 入 位 置	上部プレナムスプレーヘッド	上部プレナムスプレーヘッド 又は、下部プレナム
作 動 信 号	原子炉水位低 (レベル1) ドライウェル圧力高	PV水位低 タイマー マニュアルスイッチ
停 止 信 号	なし (マニュアル)	
注 入 ま だ の 時 間	作動信号からポンプが定格流量になるまで、最大27秒かかる。安全審査におけるDBAでは、作動信号から注入バルブが開くまでは、40秒かかる。	

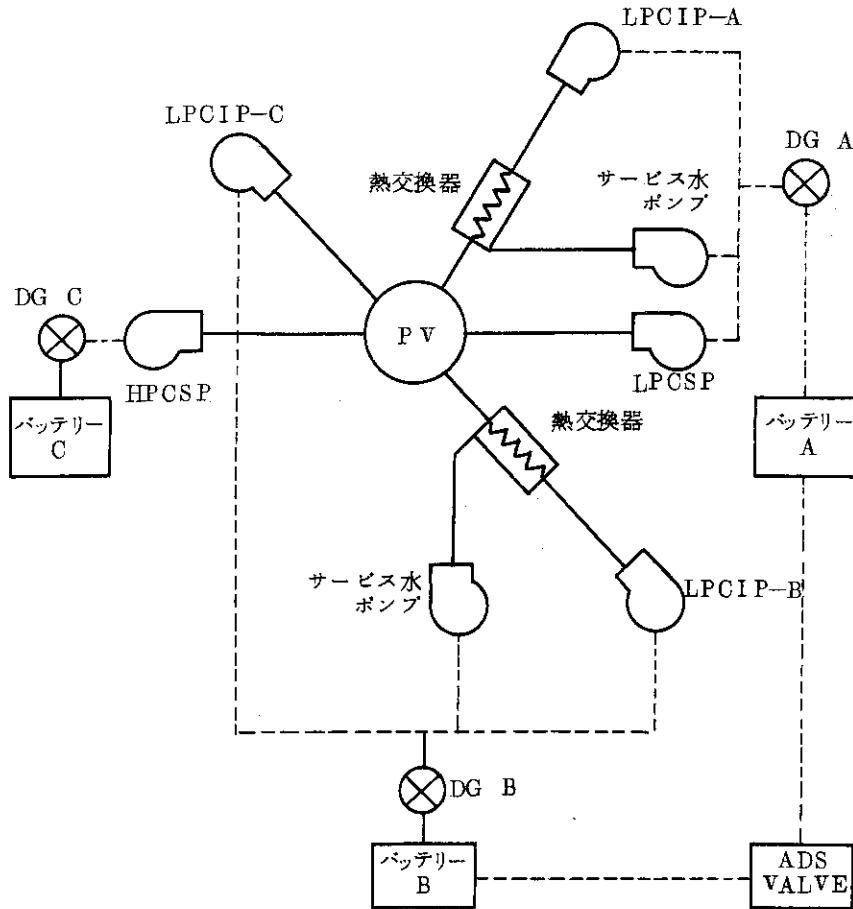


Fig. B. 13 BWR/6 ECCS 電源供給系

Table B.9 BWR/6 ECCS ラインのパイプサイズ

	Nominal Pipe Size (Inches)
I. HPCS Line	
A. Pump discharge to valve*	1 6
B. Inside containment to RPV	1 2
Total	
II. LPCI Lines	
A. Line-Loop A	
1. Pump discharge to valve*	1 8 and 1 2
2. Inside containment to RPV	1 2
Total	
B. Line-Loop B	
1. Pump discharge to valve*	1 8 and 1 2
2. Inside containment to RPV	1 2
Total	
C. Line-Loop C	
1. Pump discharge to valve*	1 8
2. Inside containment to RPV	1 2
Total	
III. LPCS Line	
A. Pump discharge to valve*	1 6
B. Inside containment to RPV	1 2
Total	

*Valve located as near as possible to outside of containment wall.

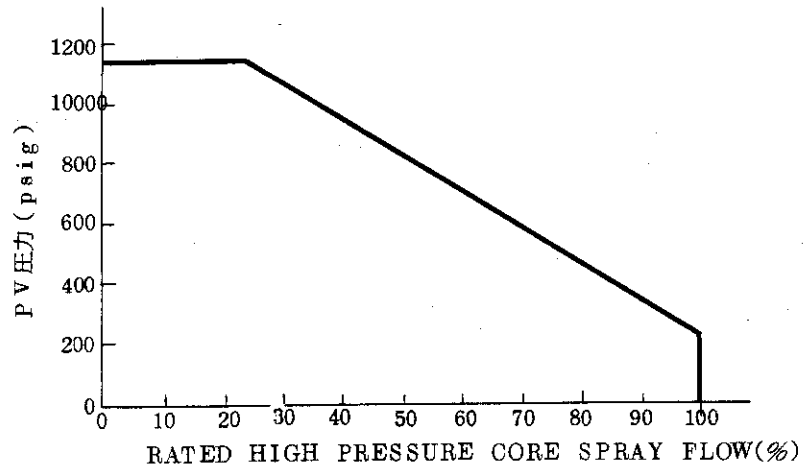


Fig. B. 14 BWR/6 HCPS の流量

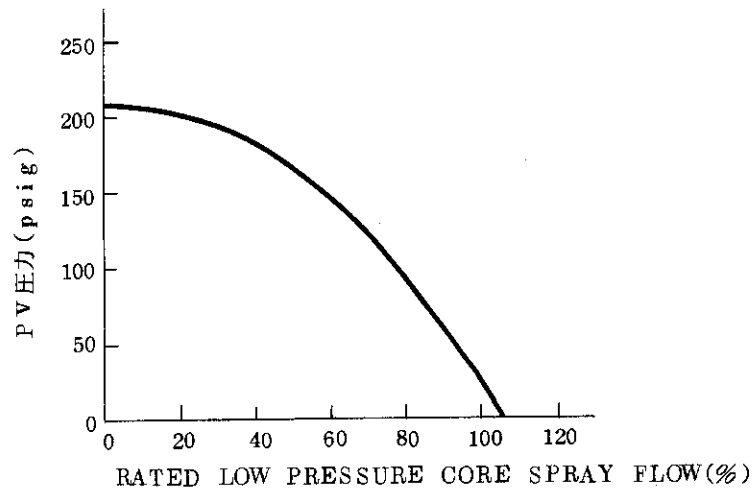


Fig. B. 15 BWR/6 LPCI の流量

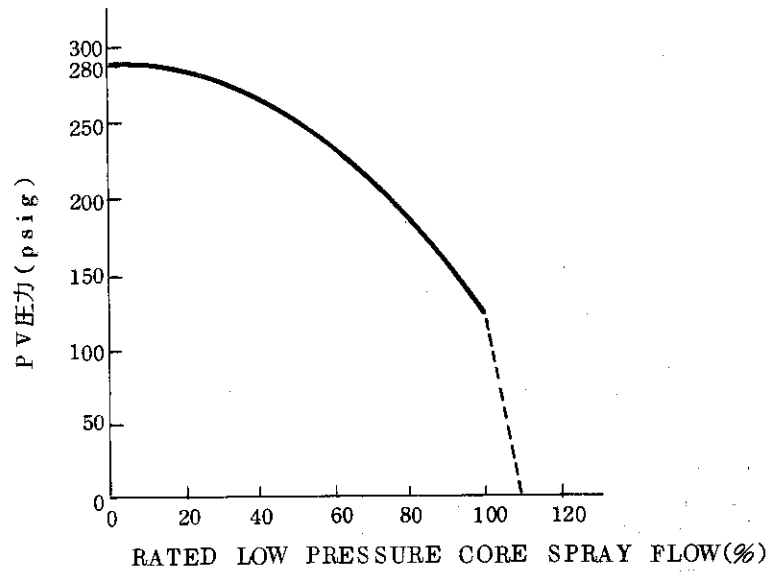


Fig. B. 16 BWR/6 LPCS の流量

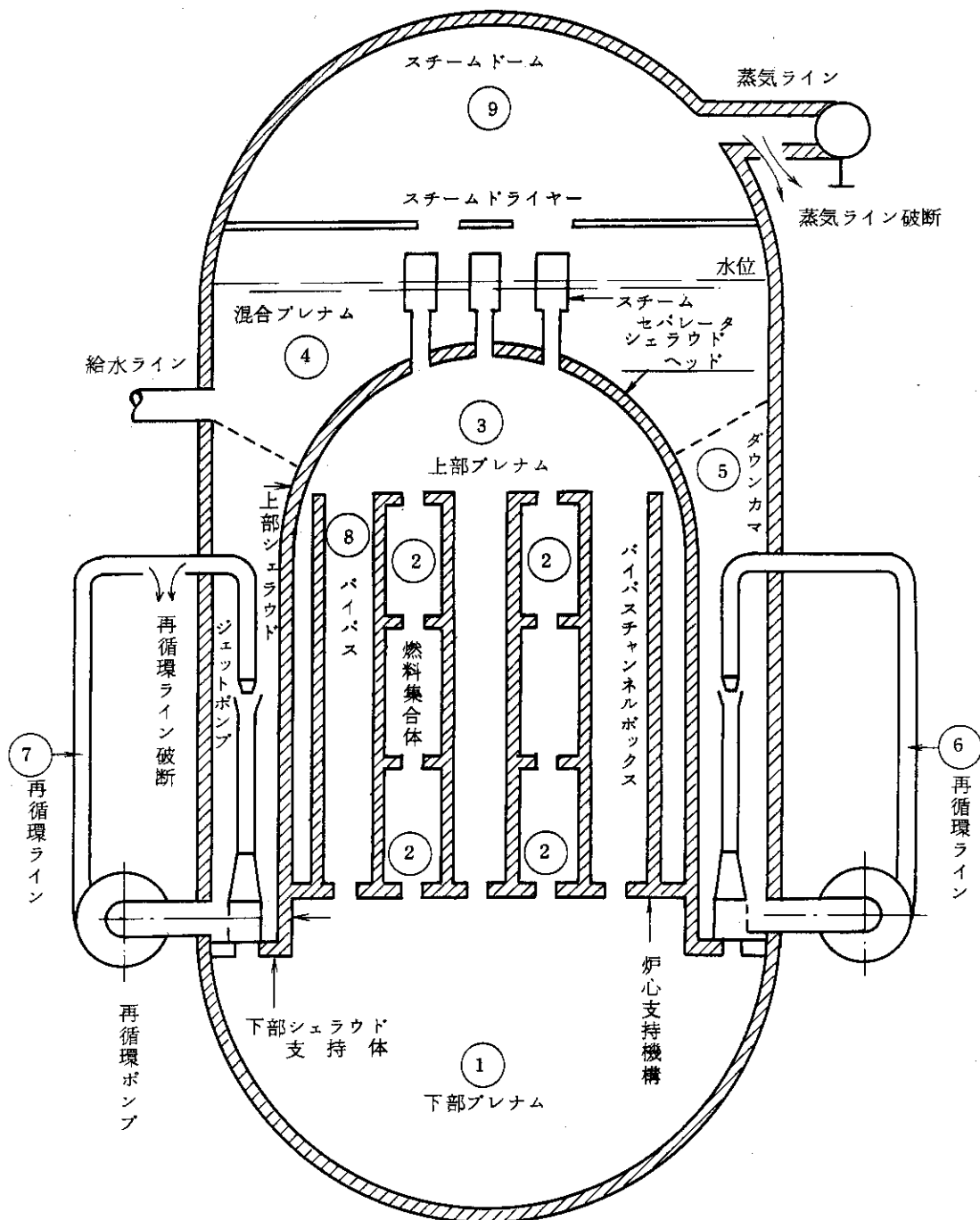


Fig. B. 17 GE社が使用しているボリューム図

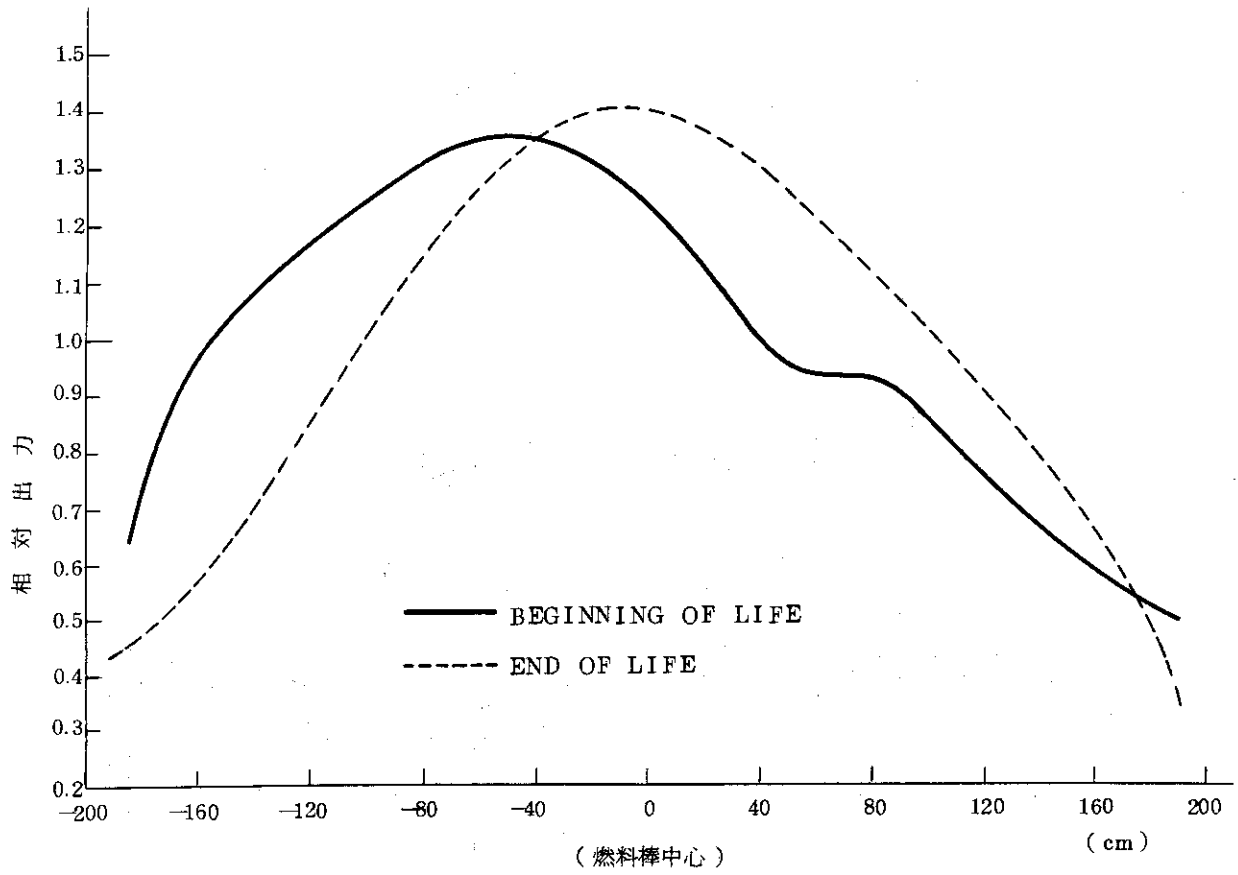


Fig. B.18 初期炉心と末期炉心の軸方向出力相対値の比較

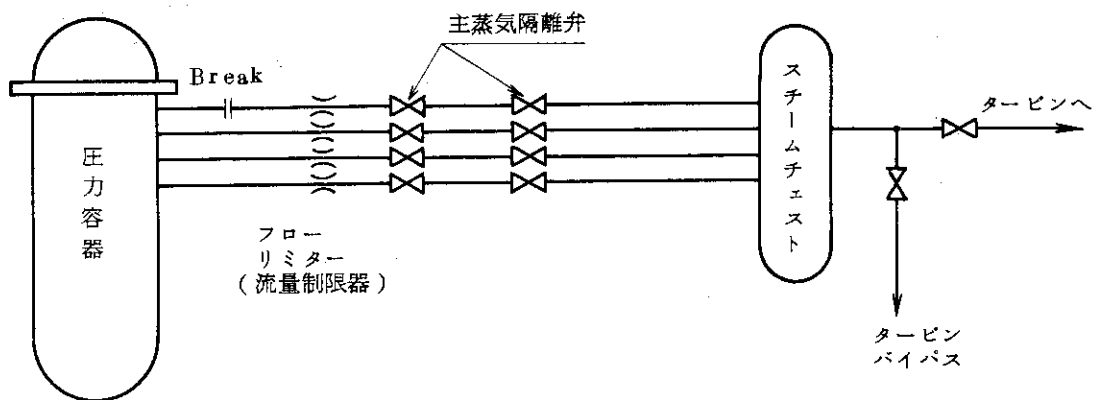


Fig. B.19 主蒸気ライン

APPENDIX C BWR/5のNRCサンプルインプット

プラントデータ・モデルおよび条件

(i) プラント・データ

熱出力	3388.0MWt
燃料バンドル数	764
燃料棒配列	7×7
ピーキングファクター（半径方向）	1.33
ピーキングファクター（軸方向）	1.49
再循環ループ数	2

(ii) モデル

BWR系をFig. C・1のように25ボリューム、36ジャンクションでモデル化する。炉心は平均出力部分とホット・チャンネルをそれぞれ1、8ボリュームで表現している。

(iii) 計算条件

- (a) 両端破断は0.001秒にジャンクション#31、#32のバルブを開けて、0.002秒にジャンクション#29のバルブを閉じることで模擬する。
- (b) 給水は1秒～4秒の間に一次関数的に零となる。
- (c) 主蒸気隔離弁はスチーム・ドームの圧力が940 psiaになったとき、又は3秒に閉じる。
- (d) ダウンカマーの水位が1.5 ft になってから非常用発電機が動き出すために必要な26.5秒経過したらECCSが“開”となる。
- (e) 再循環ポンプは0.002秒にシャットオフし、その後は自由に動けるようになる。
- (f) インプリットリストを以下に示す。

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8

R4-EM BWR DELTM=0.002 SEC FOR 5-22 SEC

* PROBLEM DIMENSION

* 010001 -2 9 5 10 25 4 0 36 2 4 1 3 25 10 5 9 1 1

* INITIAL POWER (MW) , IMPLICIT -EXPLICIT PORTION MULTIPLIER

* 010002 3388. 1.0

* EDIT VARIABLE

* 020000 AP 11 AP 1 AP 2 JW 31 JW 32 JW 14 AX 19 SR 21 ML 4

* TIME STEP

* 030010 2 1 5 0 .001 .00001 .01
 * 030020 1 25 3 0 .01 .000001 .5
 * 030030 1 50 2 0 .01 .000001 5.
 * 030040 5 100 4 0 .002 .000001 22.
 * 030050 1 200 2 0 .01 .000001 1000.

* TRIP CONTROL

* 040010 1 1 0 0 40.0 0.
 * 040020 1 -4 3 0 80. 0.
 * 040030 2 1 0 0 0. 0.
 * 040040 3 1 0 0 .001 0.
 * 040050 4 1 0 0 .002 0.
 * 040060 5 1 0 0 3.0 0.
 * 040070 6 1 0 0 1000. 0.
 * 040080 7 -5 4 0 21.5 26.5
 * 040090 8 1 0 0 .001 1000.
 * 040100 9 -5 4 0 21.38 120.

* VOLUME DATA

* 050011 0 0 1039. -1. .139857 1548. 22.25 22.25 0 224. 0. 29.92
 * 050021 2 0 1028.28 -1. .002448 6703. 12.25 5.27 0 165. 0. 41.75
 * 050031 1 0 1024.98 -1. .999 3777. 21.25 21.25 0 204. 0. 51.25
 * 050041 3 0 1031.93 532.3 -1. 3177. 32.23 32.23 0 165. 0. 10.02
 * 050051 0 0 1024. 532.3 -1. 125.25 26. 26. 0 3.67 0. -14.
 * 050061 0 0 1126.17 532.40 -1. 63. 3. 3. 0 4.0 0. -14.
 * 050071 0 0 1226.17 532.52 -1. 366. 40.53 40.53 0 3.2 0. -14.
 * 050081 0 0 1024. 532.29 -1. 136. 26. 26. 0 3.67 0. -14.
 * 050091 0 0 1126.17 532.40 -1. 63. 3. 3. 0 4.0 0. -14.
 * 050101 0 0 1226.17 532.52 -1. 366. 40.53 40.53 0 3.2 0. -14.
 * 050111 3 0 1062.16 532.33 -1. 2152. 18.42 18.42 0 120. 0. 0.
 * 050121 0 0 1049.78 -1. .058008 971.82 12.5 12.5 0 80.985 .0473 17.42
 * 050131 0 0 1045.1 -1. .00001 1477. 30.27 30.27 0 123. 0. 0.
 * 050141 0 0 1059.2 532.33 -1. 115. 15.7 15.7 0 19.69 0. 10.02
 * 050151 0 0 1059.2 532.33 -1. 115. 15.7 15.7 0 19.69 0. 10.02
 * 050161 0 0 1054.85 537.69 -1. .21228 2.5 2.5 0 .10614 .04726 17.42
 * 050171 0 0 1053.78 -1. .005420 .21228 2. 2. 0 .10614 .04726 19.92
 * 050181 0 0 1052.52 -1. .049155 .15921 1.5 1.5 0 .10614 .04726 21.92

.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

```

050191 0 0 1051.52 -1.      ,086948 ,10614 1.0 1.0 0 ,10614 ,04726 23.42
050201 0 0 1050.64 -1.      ,117279 ,10614 1.0 1.0 0 ,10614 ,04726 24.42
050211 0 0 1049.77 -1.      ,144990 ,10614 1.0 1.0 0 ,10614 ,04726 25.42
050221 0 0 1048.72 -1.      ,174299 ,15921 1.5 1.5 0 ,10614 ,04726 26.42
050231 0 0 1047.37 -1.      ,202947 ,21228 2.0 2.0 0 ,10614 ,04726 27.92
050241 0 0 1030.8 532.3 -1.      -1.      10.75 2.2 2.2 0 3.67 0.      10.
050251 4 0 14.7 100.      0.6 1.98E6 250. 0.0 1 1000. 100. -10.
    
```

* LIQUID LEVEL VOLUME CALCULATION DATA

```

060000 11 12 13 14 15 1 16 17 18 19 20 21 22 23
    
```

* BUBBLE DATA

```

060011 1.0 0.0
060021 0.0 3.0
060031 0.8 3.0
060041 0. 1.E6
    
```

* JUNCTION DATA

```

080011 1 2 0 0 29583. 191.1 52.17 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080021 2 3 0 0 4139. 312. 52.25 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080031 2 4 0 0 25444. 165. 42.0 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080041 4 15 0 0 10041.5 3.112 25.0 30. ,2084 1.17 2 0 0 2 0. 0. 11 0
080051 4 24 0 0 4750. 3.67 11.0 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080061 5 6 -1 0 4750. 3.67 -13. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080071 6 7 1 0 4750. 3.2 -13. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080081 7 15 0 0 4750. 0.538 25. 47. ,2373 6.8 0 0 0 2 0. 0. 11 0
080091 4 8 0 0 4750. 3.67 11. 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080101 8 9 -2 0 4750. 3.67 -13. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080111 9 10 2 0 4750. 3.2 -13. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080121 10 14 0 0 4750. 0.538 25. 47. ,2373 6.8 0 0 0 2 0. 0. 11 0
080131 4 14 0 0 10041.5 3.112 25. 30. ,2084 1.17 2 0 0 2 0. 0. 11 0
080141 11 12 0 0 26604.1 20.2958 17.92 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 2
080151 12 1 0 0 26604.1 37.0818 29.92 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 1
080161 11 13 0 0 2944. 2.246 18.02 0. 0. 0. 1 0 3 0 1. 0. 11 0
080171 13 1 0 0 2944. 123. 30.02 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080181 14 11 0 0 14791.5 19.69 10.12 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080191 15 11 0 0 14791.5 19.69 10.12 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
080201 11 16 0 0 34.8678 ,0266 17.92 0. 0. 0. 1 0 3 0 1. 0. 11 2
080211 16 17 0 0 34.8678 ,10614 19.92 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080221 17 18 0 0 34.8678 ,10614 21.92 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080231 18 19 0 0 34.8678 ,10614 23.42 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080241 19 20 0 0 34.8678 ,10614 24.42 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080251 20 21 0 0 34.8678 ,10614 25.42 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080261 21 22 0 0 34.8678 ,10614 26.42 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080271 22 23 0 0 34.8678 ,10614 27.92 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 3
080281 23 1 0 0 34.8678 ,0486 29.92 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 1
080291 24 5 0 1 4750. 3.67 11.0 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080301 5 7 0 3 0. 3.20 -13. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080311 24 25 0 4 0. 3.67 11. 0. 1.0 0.5 0 0 2 0 0. 0. 11 0
080321 25 5 0 4 0. 3.67 11. 0. 0.5 1.0 0 0 2 0 0. 0. 11 0
080331 0 4 1 0 4139. 4.712 40. 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080341 0 3 2 2 -4139. 14.75 72. 0. 0. 0. 1 0 3 0 0. 0. 11 0
    
```

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
080351 0 11 3 0 0. 10. 1.0 0. 0. 0. 0 0 3 0 0. 0. 11 0
080361 3 0 1 0 0. ,484 55. 1. 1. 1. 0 0 0 0 0. 0. 11 0
*
* PUMP CURVE INPUT INDICATOR
*
100000 0 0 16 0
*
* PUMP DESCRIPTION DATA
*
090011 3 4 0 1 0 1668. 1.0 44943. 710.3 22200. 20000. 47.17 0. 0
090021 3 4 0 1 0 1668. 1.0 44943. 710.3 22200. 20000. 47.17 0. 0
*
* PUMP HEAD MULTIPLIER
*
091001 -11 0. 0. ,1 0. ,15 ,05 ,24 ,8 ,3 ,96 ,4 ,98 ,6 ,97
091002 ,8 ,9 ,9 ,8 ,96 ,5 1.0 0.
*
* PUMP TORQUE MULTIPLIER
*
092001 -2 0. 0. 1. 0.
*
* PUMP STOP DATA
*
095011 0. 0. 0.
095021 0. 0. 0.
*
* PUMP HEAD AND TORQUE DATA
*
103011 1 1 5 0.0 1.31 0.25 1.25 0.5 1.20 0.75 1.12 1.0 1.0
103021 1 2 5 0.0 -0.9 ,25 -,5 ,5 -,05 ,75 ,4 1.0 1.0
103031 1 3 5 -1.0 2.1 -,75 1.775 -0.5 1.54 -,25 1.4 0. 1.31
103041 1 4 5 -1.0 2.1 -,75 1.50 -0.5 1.13 -,25 ,92 0. ,825
103051 1 5 5 0. ,4 ,25 ,53 ,5 ,625 ,75 ,80 1.0 1.0
103061 1 6 5 0. ,825 ,25 ,79 ,5 ,815 ,75 ,90 1.0 1.0
103071 1 7 5 -1.0 -1.8 -,75 -1. , -,5 -,4 -,25 ,1 0. ,4
103081 1 8 5 -1.0 -1.8 -,75 -1.72 -,5 -1.54 -,25 -1.27 0. -,9
103091 2 1 5 0. ,55 ,25 ,63 ,5 ,71 ,75 ,86 1.0 1.0
103101 2 2 5 0. -,55 ,2 -,175 ,4 ,0 ,75 ,58 1.0 1.0
103111 2 3 5 -1.0 1.77 -,75 1.23 -,5 ,83 -,25 ,62 0. ,55
103121 2 4 5 -1.0 1.77 -,75 1.52 -,5 1.32 -,25 1.13 0. 1.0
103131 2 5 5 0. -,8 0.2 -,375 0.5 -,1 ,75 ,15 1.0 ,43
103141 2 6 5 0. 1.0 ,25 ,88 ,5 ,75 ,75 ,61 1.0 ,43
103151 2 7 5 -1. -3.45 -,75 -2.75 -,50 -2.0 -,25 -1.375 0. -,8
103161 2 8 5 -1. -3.45 -,75 -2.62 -,50 -1.583 -,25 -1.15 0. -,55
*
* VALVE DATA
*
110010 4 0. 0. 0. 0. 0
110020 5 0. 0. 0. 0. 0
110030 -8 0. 0. 0. 0. 0
110040 -3 0. 0. 0. 0. 0
*
* LEAK TABLE
*
120101 2 9 30. 0 1. 1000. 1.

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8

*
* FILL TABLE
*

130101	4	2	0	0	1050,	420,18					
130102					0,	878,32	1,	878,32	4,	0,	
130103					10000,	0,					
130201	4	2	1	0	,99	548,					
130202					0,	0,	940,	0,	1025,	-280,6	
130203					3000,	-280,6					
130301	-11	7	1	1	14,7	100,					
130302					0,	15150,	59,	14200,	137,	12500,	
130303					178,	11550,	237,	9470,	268,	7576,	
130304					280,	5682,	287,	3788,	297,	1894,	
130305					304,	0,	10000,	0,			

* KINETICS CONSTANTS
*

140000	3	1	116,	0,	1,
--------	---	---	------	----	----

* REACTIVITY COEFFICIENT
*

140010	1,	1,	0,	0,
140020	0,	0,	0,	0,
140030	0,	0,	0,	0,
140040	0,	0,	0,	0,
140050	0,	0,	0,	0,
140060	0,	0,	0,	0,
140070	0,	0,	0,	0,
140080	0,	0,	0,	0,
140090	0,	0,	0,	0,

* SCRAM TABLE
*

141001	-8	4	0,	0,	0,9	0,	1,075	-0,4
141002			1,6	-4,	2,7	-10,	5,7	-28,1
141003			8,	-30,	10,	-30,		

* DENSITY REACTIVITY TABLE
*

142001	-10	.2	-11,55	.3	-8,83	.4	-6,69
142002		.5	-5,01	.6	-3,64	.7	-2,51
142003		.8	-1,55	.9	-0,73	1,	0,
142004		1,1	0,				

* DOPPLER TABLE
*

143001	-6	0,	1,85	1000,	0,	2000,	-1,71
143002		3000,	-3,	4000,	-4,28	5000,	-5,43

* HEAT SLAB DATA
*

150011	0	3	2	0	1	1	0,	687,	422,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
150021	0	2	2	0	1	1	0,	1368,	698,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
150031	0	4	2	0	1	1	0,	1916,	977,	0,	0,	0,	0,	0,	0,
150041	0	11	2	0	1	1	0,	687,	385,	0,	0,	0,	0,	0,	0,

.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

150051	4	13	3	0	1	1	1355.	1355.	239.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150061	1	2	4	0	1	1	2288.	2288.	286.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150071	11	12	5	0	1	1	197.	197.	65.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150081	12	1	5	0	1	1	94.	94.	31.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150091	11	13	6	0	1	1	6884.	6884.	95.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150101	0	11	7	0	1	1	0.	736.	46.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150111	2	3	8	0	1	1	4380.	4380.	184.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150121	0	5	9	0	1	1	0.	450.	36.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150131	0	8	9	0	1	1	0.	450.	36.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150141	0	7	9	0	1	1	0.	838.	67.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150151	0	10	9	0	1	1	0.	838.	67.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150161	12	13	10	0	1	1	4786.	4786.	112.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
150171	0	12	1	0	1	10	0.	66133.788	775.879	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150181	0	16	1	0	1	10	0.	14.446	.16948	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150191	0	17	1	1	1	10	0.	14.446	.16948	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150201	0	18	1	1	1	10	0.	10.8345	.12711	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150211	0	19	1	1	1	10	0.	7.223	.08474	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150221	0	20	1	1	1	10	0.	7.223	.08474	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150231	0	21	1	1	1	10	0.	7.223	.08474	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150241	0	22	1	1	1	10	0.	10.8345	.12711	0.	.048	0.	.0588	0.	12.
150251	0	23	1	1	1	10	0.	14.446	.16948	0.	.048	0.	.0588	0.	12.

* CORE SECTION DATA

160010	17	7	9	15	.002667	.99825862
160020	18	7	9	15	.002667	.00014574
160030	19	7	9	15	.002667	.00029727
160040	20	7	9	15	.002667	.0003058
160050	21	7	9	15	.002667	.00021578
160060	22	7	9	15	.002667	.00020296
160070	23	7	9	15	.002667	.00017922
160080	24	7	9	15	.002667	.00022540
160090	25	7	9	15	.002667	.00016921

* CORE SECTION DATA FOR EM.

160015	2	0	96.07	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	.9714	.01988	0	0
160025	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160035	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160045	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160055	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160065	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160075	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160085	2	0	0.	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	0.	.01988	0	0
160095	2	0	.1259	.8	.6	.965	.95	0	0	.05	0	0	.08333	.00127	.01988	0	0

* SLAB GEOMETRY DATA

170101	2	3	1	6	0,0	.020071	1,0
170102	1		2	2		.000721	0.
170103	0		3	8		.00267	0.
170201	1	2	4	3	0,0	.4	0.
170202	0		5	1		.0208	0.
170301	1	1	5	1	0.	.17	0.
170401	1	1	5	1	0.	.125	0.

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8

170501	1	1	5	1	0,	,33	0,
170601	1	1	5	1	0,	,0138	0,
170701	1	1	5	1	0,	,0625	0,
170801	1	1	5	1	0,	,042	0,
170901	1	1	5	1	0,	,08	0,
171001	1	1	5	1	0,	,0234	0,

*
* THERMAL CONDUCTIVITY OF UO2

180100	-20	500,	3,341	650,	2,971	800,	2,677	950,	2,439	1100,	2,242
180101		1250,	2,078	1400,	1,940	1550,	1,823	1700,	1,724	1850,	1,639
180102		2000,	1,568	2150,	1,507	2300,	1,457	2450,	1,415	2600,	1,382
180103		3100,	1,323	3600,	1,333	4100,	1,406	4600,	1,538	5100,	1,730

*
* THERMAL CONDUCTIVITY OF HE AND AR GAS

180200	2	32,	,41562	5400,	,41562
--------	---	-----	--------	-------	--------

*
* THERMAL CONDUCTIVITY OF ZIRCALLOY-4

180300	18	32,	7,812	212,	7,992	392,	8,208
180301		572,	8,784	752,	9,540	932,	10,404
180302		1112,	11,268	1292,	12,492	1472,	13,176
180303		1652,	13,968	1832,	14,796	2012,	16,128
180304		2192,	17,784	2372,	19,656	2552,	21,780
180305		2732,	24,048	3092,	28,908	3360,	33,120

*
* THERMAL CONDUCTIVITY OF MN-MO-NI-STEEL

180401	-5	32,	30,	212,	29,5	392,	28,3
180402		572,	26,6	752,	24,7		

*
* THERMAL CONDUCTIVITY OF STAINLESS STEEL

180501	-2	200,	8,33	1200,	12,92
--------	----	------	------	-------	-------

*
* VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF UO2

190101	16	32,	34,45	122,	38,35	212,	40,95
190102		392,	43,55	752,	46,8	2012,	51,35
190103		2732,	52,65	3092,	56,55	3452,	63,05
190104		3812,	72,8	4352,	89,7	4532,	94,25
190105		4712,	98,15	4892,	100,1	5144,	101,4
190106		8000,	101,4				

*
* VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF HE AND AR GAS

190200	2	32,	,000075	5400,	,000075
--------	---	-----	---------	-------	---------

*
* VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF ZIRCALLOY-4

190300	9	32,	25,92	212,	23,755	392,	30,375
190301		572,	31,59	932,	33,615	1292,	35,235
190302		1742,	36,855	1743,	35,235	3360,	35,235

.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

```

*          VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF MN-MO-NI-STEEL
*
190401  -7          130.      56.9      350.      60.8      450.      62.3
190402          530.      65.2      620.      67.2      710.      70.2
190403          800.      77.5
*
*          VOLUMETRIC HEAT CAPACITY OF STAINLESS STEEL
*
190501  -10         68.       52.8      200.      56.7      400.      61.6
190502          600.      64.       800.      66.       1000.     67
190503          1200.     68.4     1400.     71.8     1600.     75.8
190504          1800.     80.6
*
*          LINEAR EXPANSION COEFFICIENT OF UO2
*
200101  -2          0.       3.718E-6  5000.     1.2653E-5
*
*          LINEAR EXPANSION COEFFICIENT OF HE AND AR GAS
*
200201  -2          0.       0.       5000.     0.
*
*          LINEAR EXPANSION COEFFICIENT OF ZIRCALLOY-4
*
200301  -4          0.       3.094E-6  1652.     4.706E-6  1653.     5.389E-6
200302          3000.     5.389E-6
*
*          LINEAR EXPANSION COEFFICIENT OF MN-MO-NI-STEEL
*
200401  -2          0.       0.       5000.     0.
*
*          LINEAR EXPANSION COEFFICIENT OF STAINLESS STEEL
*
200501  -2          0.       0.       5000.     0.
*
*          HEAT EXCHANGER DATA
*
210101  4 3 13  0.       -0.0207  1.       -0.0207  4.       0.
210102          10000.     0.
*
*          BLOCKAGE, SWELLING, GAP REDUCTION DATA
*
250001  1 2 3 .0615  0.
*
*          ECC BYPASS INPUT DATA --DUMMY
*
260001  1 2 3 4 6 6 6 6 11 1E7 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0
*
*          MULTIPLE PIN CLAD RUPTURE DATA
*
270001  14          2500.     0.       2200.     98.7     1620.     197.
270002          1730.     395.     1660.     592.     1600.     790.
270003          1540.     987.     1480.     1184.     1440.     1882.
270004          1400.     1579.     1370.     1777.     1335.     1974.
270005          1310.     2172.     1280.     2369.
    
```

.....1.....*.....2.....*.....3.....*.....4.....*.....5.....*.....6.....*.....7.....*.....8

* * MULTIPLE PIN FLOW BLOCKAGE DATA AFTER RUPTURE *							
280001	4	34.	0.	34.	150.	21.	200.
280002		21.	1000.				
* * SINGLE PIN CLAD RUPTURE DATA *							
290001	14	2500.	0.	2200.	98.7	1620.	197.
290002		1730.	395.	1660.	592.	1600.	790.
290003		1540.	987.	1480.	1184.	1440.	1382.
290004		1400.	1579.	1370.	1777.	1335.	1974.
290005		1310.	2172.	1280.	2369.		
* * SINGLE PIN FLOW BLOCKAGE DATA AFTER RUPTURE *							
300001	14	131.	0.	131.	98.7	62.	197.
300002		47.	395.	69.	592.	95.	790.
300003		116.	987.	131.	1184.	137.	1382.
300004		131.	1579.	121.	1777.	100.	1974.
300005		76.	2172.	58.	2369.		

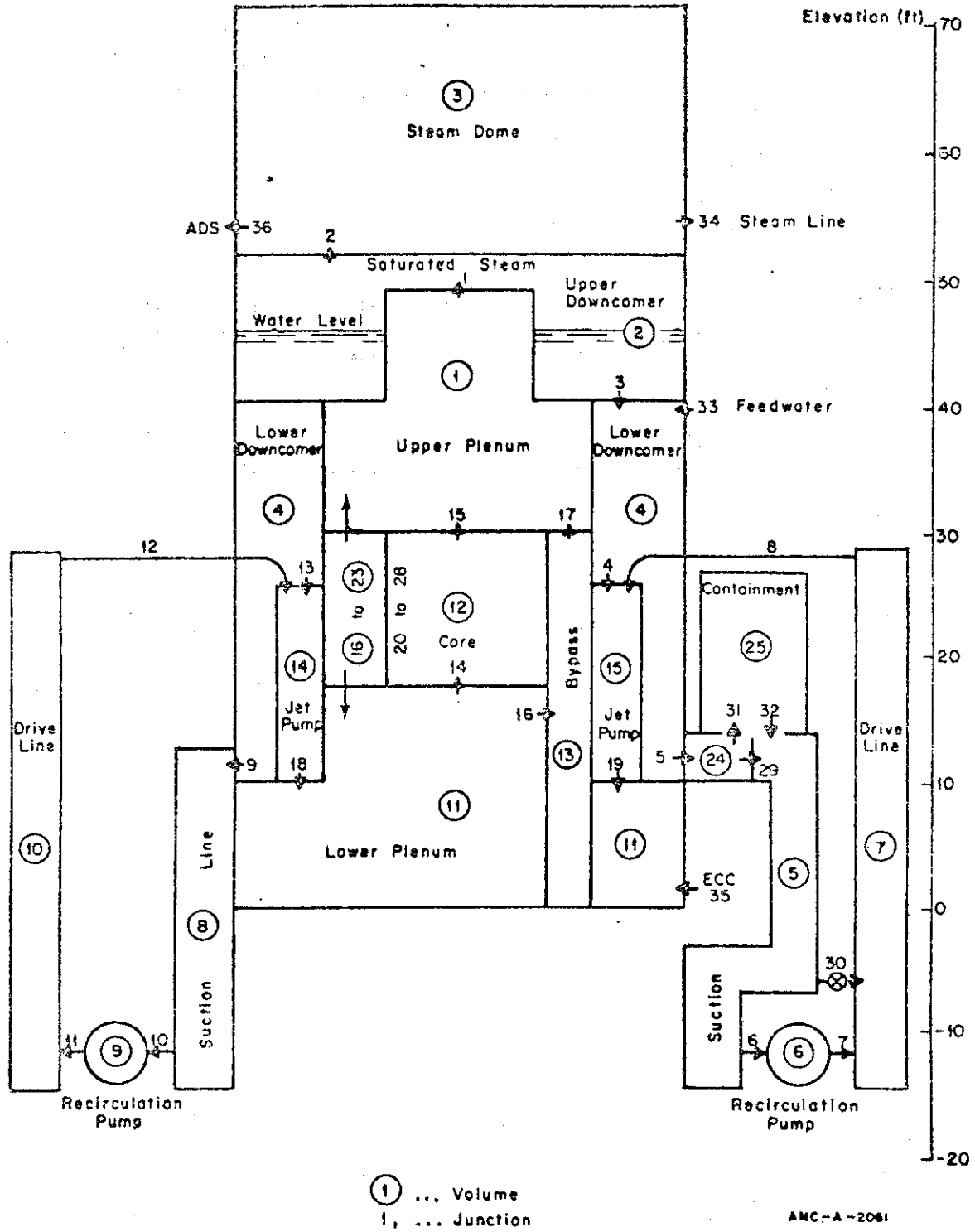


Fig. C-1 BWR Fluid System Model for RELAP4-EM Calculations