

JAERI-M

9 2 8 5

WREM-J2: 原研改良版軽水炉安全性
評価コードシステム

1981年1月

田辺 文也・藤木 和男・吉田 一雄・松本 潔*
大久保収二・坂野 和雄・吉田 博夫*・下桶 敬則*

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.

WREM-J2:原研改良版軽水炉安全性評価コードシステム

日本原子力研究所東海研究所安全解析部

田辺文也・藤木和男・吉田一雄・松本 潔*
大久保収二・坂野和雄・吉田博夫*・下桶敬則*

(1980年12月25日受理)

WREM (Water Reactor Evaluation Mode 1) コードシステムを構成コードの改良および新しいコードの開発によってWREM-J2へとバージョンアップした。これによって、小破断を含む軽水炉の冷却材喪失事故 (LOCA) を想定した場合に初期条件を与えれば評価上必要な最高被覆管温度と最高酸化層厚さを得ることができ、このコードシステムだけで一貫した解析が可能となった。すなわちBWR-LOCAにおいては炉心スプレー系が作動する期間 (大破断では再浸水再冠水期間) をも含むLOCAの一貫解析が可能となり、PWR-LOCAにおいては燃料棒・非加熱構造材間の熱輻射計算、格納容器内圧計算、さらにはFLECHT相関式を使わない再冠水計算が可能となった。

また異常過渡変化解析のための改良も行った。

この報告書はWREM-J2の構成コードとそれによる解析手法の概要を記述し、さらにWREM-J2のために行った改良の一部を記述する。

* 現所属：(財) 原子力工学試験センター原子力安全解析所

WREM-J2 : A JAERI Improved Version of WREM Code System

Fumiya TANABE, Kazuo FUJIKI, Kazuo YOSHIDA,
Kiyoshi MATSUMOTO*, Shuji OHKUBO, Kazuo SAKANO,
Hiroo YOSHIDA* and Takanori SHIMOOKE*

Division of Reactor Safety Evaluation,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 25, 1980)

WREM(Water Reactor Evaluation Model) code system has been improved to WREM-J2 version by improving constitutive codes and developing new codes. By these improvements, WREM-J2 has prepared capability of closed evaluation analysis of LWR-LOCA including small break LOCA in the sense that needed quantities (peak cladding temperature and cladding oxide thickness) can be defined by this code system itself if initial conditions are supplied.

Namely it has prepared capability of one-through calculation of BWR-LOCA including refill-reflood phase during which core spray system is actuated. Regarding PWR-LOCA analysis, it has prepared capability of calculating thermal radiation between fuel rods and structures, containment pressure calculation, and reflood calculation without using FLECHT-correlation.

Furthermore several improvements have been implemented for analysing abnormal transients.

This report describes an brief outline of constitutive codes of WREM-J2, methods of LWR-LOCA analysis and a part of improvements included in WREM-J2.

Keywords : LWR, Large Break LOCA, Small Break LOCA, ECCS, Evaluation Analysis, WREM, Computer Codes, JAERI

* Present Address : Nuclear Power Engineering Test Center - Institute for Nuclear Safety, Japan (NUPEC-JINS)

目 次

1. まえがき	1
2. 原研改良 WREM コードシステムの概要	2
2.1 WREM から WREM-J2 へ	2
2.2 WREM-J2 の構成	8
2.3 WREM-J2 を用いた LWR-LOCA 解析手法	11
3. WREM-J2 のための改良・修正	23
3.1 RELAP 4 の改良	23
3.1.1 気泡離脱モデルの改良	23
3.1.2 小破断解析のための改良	27
3.1.3 FP 崩壊熱評価部分の改良	32
3.2 RELAP/REFLA 用プロッタ・ルーチンの整備	52
3.3 CONTEMPT-LT (EM) 作成のための改良	66
3.4 TOODEE 2-J1 のための改良・修正	72
3.4.1 Zr-H ₂ O 反応速度式の改良	72
3.4.2 TOODEE 2 のその他の改良・修正	74
3.5 MOXY および MOXY-PLOT の改良・修正	81
3.5.1 MOXY のプロッタ・ルーチンの改良	81
3.5.2 MOXY (MOD 32) 中のサゴルーチンの修正	83
Appendix A PWR 再浸水・再冠水期間の炉出力計算手法	86
Appendix B PWR 再浸水期間の ECCS 流量計算手法	86
Appendix C RELAP4 によるブローダウン計算についてのノート	87
Appendix D RELAD 4 - FLOOD による再冠水解析の入力データ作成法	87
Appendix E CONTEMPT-LT (EM) による格納容器内圧計算の入力 データ作成法	90
Appendix F PWR LOCA 解析のためのノード分割法の例	91
謝 辞	102
参考文献	102

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of WREM-J2 Code System	2
2.1 History from WREM to WREM-J2	2
2.2 Constitution of WREM-J2	8
2.3 Methods of LWR-LOCA Evaluation Analysis by Using WREM-J2	11
3. Improvements and Modifications for WREM-J2	23
3.1 Improvements for RELAP4	23
3.1.1 Bubble Rise Model	23
3.1.2 Mixture Level and Vertical Slip Velocity	27
3.1.3 Estimation of FP Decay Heat	32
3.2 Development of Plotter-Routine for RELAP/REFLA	56
3.3 Condensation Heat Transfer Coefficient in CONTEMPT-LT(EM)	66
3.4 Improvements for TOODEE2-J1	72
3.4.1 Extention of Zr-Water Reaction Rate Equation	72
3.4.2 Other Modifications	74
3.5 Modifications for MOXY and MOXY-PLOT	81
3.5.1 Improvements for MOXY-PLOT	81
3.5.2 Modifications of Subroutines in MOXY-EM(MOD32)	83
Appendix A Power Calculation During PWR Refill-Reflood Period	86
Appendix B ECC Flow Calculation During PWR Refill Period	86
Appendix C Notes on Blowdown Calculation by RELAP4-EM	87
Appendix D Notes on Input Data for RELAP4-FLOOD	87
Appendix E Notes on Input Data for CONTEMPT-LT(EM)	90
Appendix F Examples of Noding Diagram for Analysis of PWR Large Break LOCA	91
Acknowledgement	102
References	102

List of Tables

Table 2.1.1	Comparison of WREM-J2 and WREM
Table 2.1.2	Analysis Performed at JAERI by Using WREM-J2
Table 3.1.1	List of Modified and Added Statements for Improving Bubble Rise Model in RELAP4
Table 3.1.2	GE+3 σ FP Decay Heat Energy
Table 3.1.3	E_j and λ_j for Each Group of Exponential to Represent GE+3 σ
Table 3.1.4	Fitting of GE+3 σ FP Decay Heat by Summation of Exponentials
Table 3.1.5	Options to Calculate Decay Heat of FP and Actinides
Table 3.1.6	List of Statements of Modified Subroutines
Table 3.2.1	A Sample Input Data for RELAP/REFLA Plotter Program (Case 1)
Table 3.2.2	Output List of RELAP/REFLA Plotter Program for Sample Input (Case 1)
Table 3.2.3	A Sample Input Data for RELAP/REFLA Plotter Program (Case 2)
Table 3.2.4	Output List of RELAP/REFLA Plotter Program for Sample Input (case 2)
Table 3.4.1	List of Modified and Added Statements in TOODEE2 for Introducing Various Equations of Zr-Water Reaction Rate
Table 3.5.1	List of Modified Statements in MOXY(MOD32)
Table 3.3.1	Uchida Heat Transfer Coefficient
Table 3.3.2	List of Modified and Added Statements in CONTEMPT-LT(EM)
Table 3.3.3	List of Modified Output Format in CONTEMPT-LT(EM)
Table A 1	Input Data for Power Calculation during Refill-Reflood Period
Table B 1	Input Data for ECC Flow Calculation During Refill Period

List of Figures

- Fig. 2.3.1 Series of Calculations in Analysis of PWR large Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 2.3.2 Flow Chart of Analysis of PWR Large Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 2.3.3 Series of Calculations in Analysis of PWR Small Break LOCA
- Fig. 2.3.4 Flow Chart of Analysis of PWR Small Break LOCA
- Fig. 2.3.5 Series of Calculations in Analysis of BWR Large Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 2.3.6 Flow Chart of Analysis of BWR Large Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 2.3.7 Series of Calculations in Analysis of BWR Small Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 2.3.8 Flow Chart of Analysis of BWR Small Break LOCA by Using WREM-J2
- Fig. 3.1.1 Mixture Level Calculations in Stacked Volumes
- Fig. 3.1.2 Enthalpy Smoothing Calculation at Junction between Stacked Volumes
- Fig. 3.1.3 Vertical Slip Velocity Calculation at Vertical Junction
- Fig. 3.1.4 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by Original RELAP4/MOD5
- Fig. 3.1.5 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Stacking Option and Wilson's Bubble Velocity Correlation
- Fig. 3.1.6 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Enthalpy Smoothing in Addition to the Case of Fig.3.1.5
- Fig. 3.1.7 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Vertical Slip Velocity in Addition to the Case of Fig. 3.1.6
- Fig. 3.1.8 Power Curve Calculation by RELAP4 Power Calculation in the Case of PWR large Break LOCA
- Fig. 3.1.9 Power Curve Calculated by RELAP4 Power Calculation in the Case of PWR Small Break LOCA
- Fig. 3.1.10 Power Curve Calculated by RELAP4 Power Curve Calculation for Checking
- Fig. 3.1.11 Difference in Cladding Temperature with ANS 1.2 and GE+3 σ
- Fig. 3.2.1 Overlay Plot of Fuel Temperature Distributions for Various Times during Reflood (from Case 1)
- Fig. 3.2.2 Axial Distribution of Heat Transfer Coefficient at 80 Seconds during Reflood in Linear Scale (from Case 1)

- Fig. 3.2.3 Axial Distribution of Heat Transfer Coefficient at 80 Seconds during Reflood in Logarithmic Scale (from Case 1)
- Fig. 3.2.4 Overlay Plot of Rod Temperature for Various Elevations (from Case 2)
- Fig. 3.2.5 Carryover Rate Fraction Calculated by RELAP/REFLA (from Case 2)
- Fig. 3.3.1 Schematic Behavior of Codensation Heat Transfer Coefficient during PWR Large Break LOCA
- Fig. 3.4.1 Weight Gain in Zr-Water Reaction Estimated by Various Equations
- Fig. 3.4.2 Oxide Thickness as a Function of Heating Time
- Fig. 3.4.3 Cladding Surface Temperatures Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction
- Fig. 3.4.4 Cladding Oxide Thickness at PCT Node Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction
- Fig. 3.4.5 Cladding Oxide Thickness at Ruptured Node Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction
- Fig. A 1 Noding Diagram for Power Calculation
- Fig. A 2 Reactivity Calculated by Blowdown Calculation and Input for Power Calculation
- Fig. A 3 Normalized Power Calculated by RELAP4-POWER Calculation
- Fig. B 1 Noding Diagram for ECC Flow Calculation
- Fig. B 2 Accumulator Flow Rate by RELAP4-ECC Calculation with Input Data Mentioned in Table B.1
- Fig. B 3 Accumulator Flow Rates in the Three Cases:
 Case 1; Blowdown Calculation
 Case 2; RELAP4-ECC Calculation with Reservoir Pressure Equal to Cold Leg Pressure of Blowdown Calculation
 Case 3; RELAP4-ECC Calculation with Reservoir Pressure Equal to Containment Pressure after End of Bypass
- Fig. B 4 Reservoir Pressures in Three Cases
- Fig. F 1 Example of Noding Diagram for PWR blowdown Analysis by RELAP4-EM
- Fig. F 2 Example of Noding Diagram for PWR Reflood Analysis by RELAP4-FLOOD
- Fig. F 3 Example of Noding Diagram for PWR Hot Channel Analysis by RELAP4-EM
- Fig. F 4 Example of Modeling Fuel Rods for PWR Hot Channel Analysis by RELAP4-EM
- Fig. F 5 Example of Array of Fuel Rods for PWR Heat-Up Analysis by TOBUNRAD
- Fig. F 6 Example of Modeling Fuel Rods for PWR Heat-Up Analysis by TOBUNRAD

1. ま え が き

原研では、昭和47年頃より軽水炉の安全性を解析評価するための計算コードの整備開発と、これらの計算コードを用いた実プラントの解析評価を実施してきた。計算コードの整備開発は、その目的のために既に海外で使用されている計算コードが存在すればそれを導入し、性能を確認したのち、新らしい知見にもとづく改良を加えたり、全く新規のものを開発する、という方法によって行われるのが通常の方法である。

実プラントの解析評価を時機を失することなく、速やかに実施するためには独自の計算コードの開発完了を待つわけにはいかない。このために安全性評価モデルとして米国NRCによって開発され、使用実績を有している WREM を導入し、この性能を評価し、実プラントの安全性評価解析に必要な改良を加えることにより、WREM の原研改良版を作りあげ、これを実プラントの解析評価に使用してきた。最近原研改良版も WREM - J2 バージョンに至り、軽水炉の冷却材喪失事故 (LOCA) 解析は小破断も大破断もこのコードシステムだけで閉じた解析が可能になり一段落の状況に至った。

以下に WREM - J2 の構成とそれを用いた軽水炉冷却材喪失事故 (LWR - LOCA) 解析手法を記述し、更に WREN - J2 のための主な改良点を報告する。なお独自性のある改良、あるいは大きな改良については別に報告する予定である。

2. 原研改良版WREMコードシステムの概要

2.1 WREMからWREM-J2へ

WREM¹⁾ (Water Reactor Evaluation Model)コード・システムは主として軽水炉の一次系配管破断による冷却材喪失事故 (LOCA) を想定した場合の安全性評価解析を目的として米国 NRC によって開発されたコードシステムである。1975年秋に我が国に導入し、必要な変換・整備を行った後原子炉の安全解析に使用した。その後 WREN 構成コードの追加および改良・修正によって WREM-J, WREM-J1 および WREM-J2 と吸ばれる改良版がつけられ (Table 2.1.1 参照), 安全解析能力の向上に努めてきた。以下にこのバージョン・アップの過程と各バージョンの特徴およびその使用実績を記述する (Table 2.1.2 参照)。

2.1.1 WREM

米国 NRC から導入したものを原研の当時の計算機 FACOM 230-75 用に変換整備したものである。これを構成するコード群は

- (1) RELAP 4 - EM (MOD 3 / Update 85)
- (2) RELAP 4 - FLOOD (MOD 3 / Update 85),
- (3) TOODEE2²⁾,
- (4) MOXY - EM (MOD 30),

であり、(1)と(2)はそれぞれ RELAP 4 (MOD 3 / Update 85) の計算オプションの1つとして存在する。

PWR の大破断 LOCA の解析においてはゴロダウン計算、ホット・チャンネル計算を(1)で、ループ再冠水解析を(2)を用いて行う。再浸水・再冠水中の燃料棒のヒート・アップ計算には(3)を使う。このバージョンでは格納容器の内圧を計算することができないので、何らかの値を外から持ちこまざるを得ない。

BWR の大破断 LOCA 解析ではスプレー作動時の再浸水、再冠水の解析能力が不十分であり、又小破断解析能力も不十分である。

このバージョンを用いて遂行された ECCS 性能評価解析は昭和 51 年度の四国電力伊方 2 号炉³⁾ (2 ループ PWR) と東京電力柏崎・刈羽炉⁴⁾ (BWR) の 2 つである。前者の解析では格納容器圧力は申請者提出の時間依存の値を使用した。後者の再浸水・再冠水解析においては再冠水時刻を計算コードを用いずに概算で評価した。

2.1.2 WREM-J

WREM に格納容器圧計算コード CONTEMPT-LT (EM) を加えて、PWR 再冠水時の背圧計算を可能にした。

このバージョンは昭和 52 年度の九州電力川内炉⁵⁾ (3 ループ PWR) の ECCS 性能評価解析に使

用された。

2.1.3 WREM-J1

このバージョンでは次に述べる改良が行われた。

- (1) RELAP 4 が MOD 3/Update85 から MOD 5/U2/J1, さらには MOD 6/U4/J1, MOD 6/U4/J2 へとバージョン・アップされたことにより小破断 LOCA 解析及び異常過渡現象をより適切に解析することが可能になった。
- (2) PWR の再冠水解析において FLECHT 相関式を使わずに炉心内熱水力の挙動を解析できるように RELAP/REFLA⁴⁾ コードを作成した。
- (3) PWR のヒート・アップ計算において燃料棒間および燃料棒と非発熱材との間の熱放射を計算できるように TOBUNRAD⁷⁾ コードを作成した。
- (4) BWR の燃料集合体ヒート・アップ計算用のコード MOXY-EM が MOD 30 から MOD 32 へとバージョン・アップされ燃料棒が独立に破裂するような計算が可能になった。

このバージョンを使用して行われた大破断 LOCA 解析は発電用 PWR の大破断 LOCA-ECCS 性能評価解析〔関西電力高浜 3, 4 号炉⁸⁾(3 ループ PWR), 日本原子力発電敦賀 2 号炉(4 ループ PWR)〕, 京都大学第 2 号研究炉の大破断 LOCA 解析⁹⁾, 原子力船「むつ」原子炉の大中破断 LOCA 解析がある。更に小破断 LOCA 解析としては「むつ」原子炉の解析, 大飯 1 号炉の安全解析¹⁰⁾, TMI 2 号炉の事故解析^{11)~13)} があげられる。大飯 1 号, TMI 2 号炉の場合には給水喪失に帰因する過渡現象の解析をも含んでいる。

とくに TMI 2 号炉の事故解析の結果は事故記録との一致もかなりよく, このバージョンの異常過渡現象および小破断 LOCA に対する解析能力の高さを示している。このバージョンでの RELAP 4 の最終改良版は RELAP 4/MOD 6/U4/J2 である。

2.1.4 WREM-J2

RELAP 4/MOD 6/U4/J3¹⁴⁾ の開発により BWR-LOCA の炉心スプレー作動時の 1 次系の熱水力的挙動の解析が可能となり, BWR の大中破断, 小破断 LOCA にたいしてこのコード・システムだけで閉じた解析が可能となった。即ちこの WREM-J2 においてはじめて LWR (PWR, BWR を問わず) の LOCA 解析が極小破断から大破断まで閉じた解析ができるようになったのである。

原子力船「むつ」原子炉の大中破断 LOCA 解析にあたっては RELAP 4/MOD 3/Update 85, TOODEE 2 をそれぞれを「むつ」原子炉用に改良した RELAP4-EM/SUS および TOODEE 2/SUS, 又は TOBU-NRAD/SUS を使用した。

Table 2.1.1 Comparison of WREM-J2 and WREM

	Name of Codes	Items of Calculation
WREM(Original)	(1) RELAP4-EM(MOD3)	PWR/ System Blowdown PWR/ Hot Channel during Blowdown PWR/ Power during Refill-Reflood Period BWR/ System Blowdown
	(2) RELAP4-FLOOD(MOD3)	PWR/ System Reflood
	(3) TOODEE2	PWR/ Fuel Heat-Up during Refill-Reflood Period
	(4) MOXY-EM(MOD30)	BWR/ Fuels Heat-Up during LOCA
WREM-J2(JAERI-Improved Version)	(1) RELAP4-EM(MOD6/U4/J3)	PWR/ System Blowdown PWR/ Hot Channel during Blowdown PWR/ Power during Refill-Reflood PWR/ ECC Flow during Refill Period BWR/ System Blowdown-Refill-Reflood BWR/ Hot channel during Blowdown
	(2) RELAP4-FLOOD(MOD6/U4/J3)	PWR/ System Reflood
	(3) TOODEE2-J1	PWR/ Fuel Heat-Up during Refill-Reflood Period
	(4) TOBUNRAD(Ver.1)	PWR/ Fuels-Heat-Up during Refill-Reflood Period Taking Account of Thermal Radiation between Fuel Rods and Structures
	(5) CONTEMPT-LT(EM)	PWR/ Containment Pressure during LOCA
	(6) MOXY-EM(MOD32)	BWR/ Fuels Heat-Up during LOCA
	(7) RELAP/REFLA	PWR/ System Reflood without Using FLECHT-Correlation
	(8) RELAP4-EM/SUS	PWR with SUS-Cladded Fuel Rods/ Blowdown -----/ Hot Channel -----/ Power
	(9) TOBUNRAD/SUS	-----/ Fuels Heat-Up

Table 2.1.1.2 Analysis Performed at JAERI by Using WREM-J2

対象原子炉	解析課題	解析項目	使用したWREM のバージョン	使用コード	目的	計算年月
① 米国BWR 標準プラント	再循環ポンプ 吸込配管 大破断	ブローダウン ヒート・アップ	WREM	RELAP 4-EM (MOD 3) MOXY-EM (MOD 30)	WREM 性能評価のため	1976年6月 完了
② 米国PWR 標準プラント	コールドレグ 大破断	ブローダウン ホットチャンネル 再冠水 ヒート・アップ	WREM	RELAP 4-EM (MOD 3) 同上 RELAP 4-FLOOD (MOD 3) TOODEE 2	同上	1976年6月 完了
③ 伊方2号炉 (2ループ) PWR	コールドレグ 大破断	ブローダウン ホットチャンネル 再冠水 ヒート・アップ 水-Zr反応量 炉出力減衰	WREM	RELAP 4-EM (MOD 3) 同上 RELAP 4-FLOOD (MOD 3) TOODEE 2 RELAP 4-EM (MOD 3)	安全審査参考用	1977年4月 完了
④ 柏崎・刈羽炉 (BWR)	再循環ポンプ 吸込配管 大破断	ブローダウン ヒート・アップ 炉水位	WREM	RELAP 4-EM (MOD 3) MOXY-EM (MOD 30)	同上	1977年4月 完了
⑤ 原子力船 「むつ」 (2ループ) PWR	コールドレグ 大中破断	ブローダウン ホットチャンネル 格納容器内圧 再冠水 ヒート・アップ 輻射効果 水-SUS反応 炉出力減衰	WREM- J1/SUS	RELAP 4-EM/SUS 同上 CONTEPT-LT (EM) RELAP/REFLA TOBUNRAD/SUS (TOODEE 2/SUS) RELAP 4-EM/SUS	共同研究	1976年12月 1978年12月

対象原子炉	解析課題	解析項目	使用したWREM のパバージョン	使用コード	目的	計算年月
川内炉 3ループ (PWR)	⑥ コールドレグ 大破断	ブローダウン ホットチャンネル 格納容器内圧 再冠水 ヒート・アップ 放射効果 水-Zr反応 炉出力減衰	WREM-J	RELAP4-EM(MOD3) 同上 CONTEMP-T-LT(EM) RELAP4-FLOOD(MOD3) TOODEE2 RELAP4-EM(MOD3)	安全審査参考用	1977年9月 完了
京大研究炉	⑦ 1. 大破断 2. 流路閉塞	ブローダウン	WREM-J1	RELAP4(MOD5/CHF) 同上	同上	1978年11月 完了
高浜3,4号炉	⑧ コールドレグ 大破断	川内炉と同じ (但し水-Zr反応 量について感度解 析)	WREM-J1	RELAP4-EM(MOD5/U2/J1) 同上 CONTEMP-T-LT(EM) RELAP4-FLOOD(MOD5/ U2/J1) TOBUNRAD TOODEE2 RELAP4-EM(MOD5/U2/J1)	同上	1978年12月 完了
TMI-2号炉	⑨ 給水喪失 加圧器逃し弁 開固者 (小破断)	異常過渡変化 小破断ブローダウン ヒート・アップ	WREM-J1	RELAP4-MOD6/U4/J1 TOODEE2-J1	事故解明のため (第1次)	1979年4月 1979年8月
同上	⑩ 同上	同上	同上	RELAP4/UD6/D4/J2 TOODEE2-J1	事故解明 (第4次)	1979年9月 1980年6月

	対象原子炉	解析課題	解析項目	使用したWREM のパバージョン	使用コード	目的	計算年月
⑪	大飯1号炉 (4ループ) PWR	給水喪失 加圧器逃し弁 開固着 (小破断)	異常過渡変化 小破断ブローダウン	WREM-J1	RELAP4/MOD5/U2/J1	安全性総点検参 考用	1979年5月 実施
⑫	原子力船 「むっ」	同上	同上	同上	同上	受託研究	1980年3月 完了
⑬	敦賀2号炉 (4ループ) PWR	コールドレグ 大破断	高浜3.4号炉と同じ	同上	高浜3.4号炉と同じ (但しTOBUNRADは使用せず)	安全審査参考用	1980年3月 完了
⑭	原子力船 「むっ」	蒸気発生器 細管破断		WREM-J1	RELAP4/MOD6/U4/J2	受託調査	1980年12月 完了

2.2 WREM-J 2の構成

2.2.1 RELAP 4-EM (MOD 6/U 4/J 3)¹⁴⁾

NEA Data Bank より導入したRELAP 4/MOD 6/Update 4¹⁵⁾を原研において変換整備し¹⁶⁾、更に改良したものである。このコードは過渡変化を解析するにあたって、系内を多数のノードに分割し、流路としてノード間を結ぶジャンクションを設けて質量、運動量およびエネルギー保存則の連立方程式を解く。炉心における熱発生源としては核分裂によるエネルギー、核分裂生成物およびアクチニドの崩壊エネルギーの3つである。

核分裂エネルギーは6群の遅発中性子を考慮に入れて一点近似のKineticsを除く。核分裂生成物の崩壊エネルギーはANSの標準テーブルおよびその1.2倍又は $GE + 3\sigma$ の値を用い、アクチニドの崩壊エネルギーは内蔵されているANSの標準式を使用する。

このコードを使って過渡変化時(PWRの再冠水を除く)の系の挙動を解析することにより、各ノード内の冷却材圧力、エンタルピー、密度およびノード間の流量の他、炉出力および燃料棒温度等を出力として得ることができる。

原研においてJ 3バージョンを作るために施した主な改良点は次の諸点である。

- (1) 炉心スプレー作動時のBWR+LOCA解析のための改良
 - (a) 炉心スプレー水のCCFL (Counter Current Flow Limiting) 効果をWallis型の相関式を用いて計算できるようにしたこと
 - (b) スプレー熱伝達、再冠水熱伝達を簡単なモデルで計算できるようにしたこと
 - (c) 炉心バイパス領域から下部プレナムへの漏えいをGE相関式から計算するオプションを追加したこと
 - (d) 核分裂生成物崩壊エネルギーを $GE + 3\sigma$ の値を使うオプションを追加したこと
- (2) 小破断解析のための改良
 - (a) 多層構造ノードにおける水位計算の改良
 - (b) 鉛直方向スリップ計算に使用されるボイド率の修正
 - (c) 鉛直方向ジャンクションのエンタルピー平滑化手法の拡張
- (3) その他の改良
 - (a) トリップ・リセット機能の設置
 - (b) リーク・テーブルの独立変数の追加
 - (c) リスタート時に入力可能な入力データの拡張

RELAP 4-EMは大破断LOCA解析ではPWRのブローダウン計算、BWRのブローダウン開始から再冠水終了までの計算に使用され、小破断LOCA解析は開始から終了までの計算に使用されるのが主である。その他の使用方法としてはブローダウンの中のホット・チャンネル計算、PWRの再浸水・再冠水中の炉出力減衰計算およびPWR再浸水中のECCS流量計算に使用することができる。

2.2.2 RELAP 4-FLOOD (MOD 6/U 4/J 3)

このコードの由来はRELAP 4-EM (MOD 6/U 4/J 3)と同じであり、RELAP 4

(MOD 6/U4/J3)の計算オプションのひとつとして存在する。PWRの再冠水期間中における一次冷却系全体の挙動の解析がRELAP 4-FLOODによって行われる。このコードのRELAP 4-EMと異なる主な点は次の4つである。

(1) 炉心における熱伝達

PWR-FLECH実験に基づくW社のFLECHT相関式^{16) 18)}(炉心底より3 ft以上)とAerojet相関式(炉心底より3 ft以下)を使って燃料棒表面熱伝達係数を計算する。

(2) 炉心出口流量

PWR-FLECHT実験に基づくキャリー・オーバー率(=炉心出口流出/炉心入口流量)の相関式としてB&W又はAerojetの相関式を使用して炉心出口流量を計算する。

(3) 蒸気発生器二次側における熱伝達

蒸気発生器U字管の二次側表面における熱伝達は自然対流の熱伝達率の式を使って計算する。

(4) 圧力容器側破断口のとり方

再冠水期間中はごく初期を除くとダウンカマー水位は低温側配管の圧力容器貫通部においてダウンカマーから破断口へ至る流れは層状流となっていると考えられる。これを模擬するためにダウンカマーから格納容器への蒸気流路と液相水流路を分離して設ける。

2.2.3 CONTEMPT-LT(EM)

CONTEMPT-LT/022を^{19) 20)}米国NRCの安全審査用技術指針 Branch Technical Position CSB 6-1に規定されている最小格納容器内圧モデルに適合するように原研において改良したEM版である。即ち、格納容器内壁および格納容器内構造物の表面における蒸気凝縮熱伝達係数の計算に上記の最小格納容器内圧モデルの式を使うようにしたものである。

このコードは冷却材喪失事故の全期間にわたる格納容器内圧を計算するものであり、とくに再冠水期間中の内圧は再冠水速度を規定する重要な因子である。

2.2.4 TOODEE 2-J1

米国NRCより導入したWREM中のコードを原研において変換整備し、更に次の改良を施したものである。

- (1) 水-Zr反応の式としてBaker-Justの式以外に川崎の式、池田の式および一般化された放物線則の式を使えるようにした。
- (2) 逆流蒸気流の場合にも流路閉塞の効果を計算できるようにした。
- (3) 燃料棒プレナム部の温度を評価する新しい機能を追加したこと。

このコードを用いて、単一燃料棒のリフィル・再冠水期間中のヒート・アップ挙動を解析する。リフィル期間中の燃料棒表面の熱伝達は断熱として取扱う。再冠水速度が1 in/sec以上に対しては15×15燃料集合体に対するFLECHT熱伝達相関式を適用する。1 in/sec未満に対しては蒸気冷却としてDittus-Boelterの式を適用する。燃料棒の変形および被覆管の酸化反応(反応速度の式はBaker-Justその他の式)を考慮している。

2.2.5 TOBUNRAD (Ver. 1)⁷⁾

TOBUNRADは、TOODEE 2 複数個を結合して、PWRの燃料集合体を構成する各燃料棒の個別（又は群別）の挙動を計算すると同時に、これら燃料棒間及び集合体内の非加熱棒（制御棒クラスター案内シムプル等）との間の熱輻射相互作用をとり入れた解析を可能にするため、原研で開発されたコードである。熱輻射効果の計算には原研開発のヒート・アップコードSCORCH²¹⁾の輻射パッケージ部分を利用している。複数個のTOODEE 2 プログラム及び熱輻射計算パッケージの結合に際しては、FORTRAN言語による「割込方式」に依っているのがプログラム上の特徴である。

個々のTOODEE 2の機能はそのまま保存されており、加えて再冠水期間中に再冠水率が1 in/secよりも小さくなると蒸気冷却モデルを適用する場合の蒸気過熱開始点（炉心底よりの高さ）を外部から入力できるように改良されている。尚、このコードで熱輻射相互作用が計算されるのは再浸水期間、及び蒸気冷却時のみである。

2.2.6 MOXY-EM (MOD 32)

NEA Data Bankより導入したものを原研で変換・整備したものであり、MOXY-EM (MOD 30)の改良版である。MOXY-EMはBWR-LOCAの全期間中の燃料バンドルのある着目高さ位置での挙動をWater rod、チャンネル側板も含めて熱輻射を考慮に入れて計算するものである。スプレー熱伝達係数はBWR-FLECHT実験^{22) 23)}に基づく燃料棒位置に依存する値（1.5, 3.0, 3.5 Btu/hr·ft²·F）が内蔵されており、チャンネル側板およびWater rodの上からのリウエッティングは山内の式を用いて評価することができる。

2.2.7 RELAP/REFLA⁶⁾

WREMコードシステム中の再冠水解析コードRELAP 4-FLOOD (MOD 3/Update 85)をベースに、その炉心部の熱水力解析部分をREFLA-1Dコード²⁴⁾で置き換えた再冠水解析コードである。

REFLA-1Dは原研安工第2研究室において開発された一定注水率再冠水実験解析用コードであり、一次元UVUTモデルを使用している。RELAP 4との結合にあっては時間依存の炉心入口境界条件が適用できるよう改造されている。オリジナルのRELAP 4-FLOODでは炉心の熱伝達及びCRF (Carryover Rate Fraction)の評価にFLECHT実験による相関式を使用しているため12ft炉心（陸上PWR）以外への適用は困難である。しかしRELAP/REFLAでは原理上任意の形状の炉心を有する原子炉（PWRタイプ）の再冠水解析が可能となる。

2.2.8 RELAP 4-EM (MOD 5/U 2/J 1)

2.2.9 RELAP 4-FLOOD (MOD 5/U 2/J 1)

NEA Data Bankより導入したRELAP 4 (MOD 5/update 2)²⁵⁾を原研において変換・整備し¹⁶⁾更に原研において次の諸点を改良したものである。

- (1) Wilsonの気泡離脱速度の関係式を組み込んで使用できるようにした。

- (2) 水位が多段に出現することがないようにする機能の改良と、それに関連する流路結合点のエンタルピーの平滑化の手法の改良。
- (3) 垂直方向スリップ・モデルに使用されるボイド率の計算の修正。
- (4) エンタルピー平滑化の手法における誤りの修正。

これらのコードの機能は基本的に RELAP 4-EM (MOD 6/U 4/J 3), RELAP 4-FL-
OOD (MOD 6/U 4/J 3) の機能の中に含まれているので通常は使用する必要はないと考えら
れる。しかしながら MOD 6/U 4/J 3 には未チェックの部分が存在するので MOD 6/U 4/J 3
でトラブルが発生した場合に便宜的に MOD 5/U 2/J 1 を用いることにしてもよいであろう。

2.2.10 RELAP 4-EM/SUS²⁶⁾

RELAP 4-EM/SUS は、WREMコードシステムの中心をなす汎用熱水力学解析コード
RELAP 4-EM (MOD 3/Update 85) を「むつ」炉解析用に改造し、同時にいくつかのプロ
グラム・ミスを訂正、改良したものである。RELAP 4-EMのオリジナル版はジルカロイ被覆
管を有する陸上軽水炉を対象としたものであるため、「むつ」炉への適用にさいしては(1)被覆管
材質が SUS 27 であること、(2)ギャップガス中に多量の水蒸気が存在すること、の 2 点に対して
以下のような修正が必要であった。

- (1) SUS に対する物性値 (linear expansion coefficient, elastic modulus, Poisson's
ratio) を組み込む。
- (2) SUS 被覆管に対するスウェリングおよび破裂モデルの組み込み。
- (3) 金属-水反応評価式を SUS-水反応に対するものに変更。
- (4) ギャップガスの組成として水蒸気を考慮できるようにする。
- (5) ギャップコンダクタンスが小さい場合の燃料棒初期状態計算の改良。
- (6) 核分裂生成物崩壊エネルギーを $GE + 3\sigma$ の値を使えるように修正。

2.2.11 TOODEE 2/SUS²⁶⁾

WREMコードシステムの PWR ヒート・アップ解析用コード TOODEE 2 をベースに、「むつ」
炉解析に適するよう改良を行ったものである。修正点は RELAP 4-EM/SUS の場合と同様で
あるが、それに加えて SUS の一部の物性値 (Thermal conductivity, Heat capacity) の入力
のために内蔵データテーブルを修正する必要があった。

2.2.12 TOBUNRAD/SUS

TOBUNRAD (Ver. 1) に TOODEE 2/SUS と同じ修正を施したものである。

2.3 WREM-J2 を用いた LWR-LOCA

2.3.1 PWR 一大破断 LOCA 解析

1. 使用コード

発電用 PWR の大破断 LOCA 時の ECCS 性能評価上必要とされるのは次の 5 つのコードである。

- (1) RELAP 4-EM (MOD 6/U4/J3)
- (2) RELAP 4-FLOOD (MOD 6/U4/J3)
- (3) CONTEMPT-LT (EM)
- (4) TOODEE 2-J1
- (5) TOBUNRAD (Ver. 1)

2. コードの使用方法

PWR の一次系配管大破断による冷却材喪失事故 (LOCA) は大別して、ブローダウン、リフィル、再冠水の 3 つの過程に分けて考えることができる。これらの過程を解析する計算系列は Fig. 2.3.1 に示すように 4 つある。即ち燃料棒挙動計算、一次ループ熱水力計算、格納容器内圧計算および炉出力減衰計算である。そのうち最も重要な系列は前二者であり、燃料棒温度計算は一次ループ熱水力計算の結果を境界条件として遂行されるものである。また格納容器内圧計算は再冠水過程の一次ループ計算の境界条件の一部を与えるものである。これら 4 系列の解析においてそれぞれの過程ないしは現象を分担する計算コードは Fig. 2.3.1 に示されている通りである。一方、これらのコード間のデータの授受を含む計算の流れを Fig. 2.3.2 に示す。

(1) 一次ループ熱水力解析計算及び格納容器内圧計算

まず RELAP 4-EM によりブローダウン過程における一次ループ全体の挙動を計算する。RELAP 4-ECC 計算により得られた ECCS 流量を積分することによって再冠水開始時刻 (BOCREC 時刻) を決定する。

RELAP 4-FLOOD による再冠水過程の解析には BOCREC 時の原子炉の状態が必要である。炉出力は炉出力減衰計算から、燃料棒温度は TOODEE 2 によるフィルム期間の平均出力燃料棒に対する断熱計算から、また格納容器内圧は CONTEMPT-LT (EM) による計算から得られる。蒸気発生器 2 次側条件はブローダウン計算のバイパス終了時のものを使用する。ECCS 流量はブローダウン計算結果を使用する。以上の諸量及び格納容器内圧を初期条件ないしは境界条件として再冠水過程の一次ループ熱水力解析を RELAP 4-FLOOD で行う。

BOCREC 時の平均出力炉心部の被覆管表面温度軸方向分布はバイパス終了まで RELAP 4-EM のホットチャンネル計算で平均出力炉心部の燃料棒温度を計算し、バイパス終了時での燃料棒条件を初期条件として TOODEE 2 によって断熱計算を行って得られる。

再冠水過程の境界条件の一つである格納容器内圧の挙動は CONTEMPT-LT (EM) を用いて計算する。このためにブローダウン期間中は RELAP 4-EM の計算結果より破断流量と放出エネルギー率が入力として使用され、再冠水期間中は RELAP 4-FLOOD で計算された破断流量と放出エネルギー率が入力に使用される。従って、再冠水期間に対しては RELAP 4-FLOOD と CONTEMPT-LT (EM) を交互にくり返し計算をして両コードの計算結果を相互に収束させている。

再冠水期間中の炉出力については、ブローダウン計算によって得られた反応度が再冠水期間中にも外挿できるものと仮定して、RELAP 4-EM の 1 ボリューム計算を行って出力の減衰曲線を求めている。このような使い方を便宜的に RELAP 4-Power と名付ける。

(2) 燃料棒挙動解析計算

ブローダウン計算結果を用いて、RELAP 4-ホット・チャンネル計算により最高出力アッセンブリの最高出力燃料棒、平均出力燃料棒および制御棒クラスター案内シンプルの挙動をECCバイパス終了時まで計算し、同時刻における燃料棒の状態（温度分布、被覆管の酸化量、歪等）および制御棒クラスター案内シンプルの温度をTOBUNRADの初期条件として入力する。

ホット・チャンネル計算とは、ブローダウン計算により決定された上部、下部両プレナムの状態量（温度、圧力、クオリティ）と炉出力変化を境界条件としてホットアッセンブリの熱水動的挙動をより詳細に（その際、通常はブローダウン計算よりも細分化された炉心ノード分割および燃料棒分割を用いて）解析するものを指す。

TOBUNRAD計算は再冠水期間中の炉心圧力、再冠水速度、炉心出口蒸気流量および蒸気過熱開始点（再冠水速度が1 in/sec以下のときの蒸気冷却時に使用される）としての炉心水位を入力データとして必要とするが、それらはRELAP 4-FLOODの計算結果を使用する。このTOBUNRAD計算によって、着目している物理量である最高被覆管温度（PCT）と局所最大被覆管酸化層厚さ（COT）を得ることができる。

更に全炉心被覆管酸化量が必要なときには、炉心内の燃料集合体を半径方向ピーキング係数によっていくつかの群に分けて、それぞれの群の燃料集合体中の平均出力燃料棒に対してホット・チャンネル計算、TOODEE 2計算を行って、各群における酸化量を得てそれを積分すればよい。

2.3.2 PWR - 小破断LOCA解析

1. 使用コード

発電用PWRの小破断LOCA時のECCS性能評価上必要とされるのは次の2つのコードである。

- (1) RELAP 4-EM (MOD 6/U 4/J 3)
- (2) TOODEE 2 -J1。

2. コードの使用方法

PWRの一次系配管小破断による冷却材喪失事故（LOCA）は大破断LOCAの場合とは異なり、一次系からのブローダウンが長時間持続し、かつ通常は破断口の臨界流条件が成立しなくなるほど圧力が下がらないことが多いので格納容器内圧計算は不要である。従ってこの過程を解析する計算系列は大破断LOCAに比して簡略化してFig. 2.3.3に示すように一次ループ熱水力解析と燃料棒挙動解析の2系列とすることができる。これら2つの系列の各々のコードが分担する現象と過程はFig. 2.3.3に示しており、解析計算における各コードの間のデータの授受を含む計算の流れはFig. 2.3.4に示したとおりである。

(1) 一次ループ熱水力解析計算

RELAP 4-EMにより一次系ループ全体の挙動を一貫して計算する。この場合、炉心水位変化に伴う熱伝達の変化、蒸気発生器（SG）両側の水位変化に伴う熱伝達の変化を模擬するために、燃料棒およびSG伝熱管壁を表わすヒートスラブは鉛直方向に複数個に分割して、そ

それぞれの高さ位置における局所クォリティに基づいて熱伝達を計算するようにしなければならない。その他の構造材を考慮するときも同様である。

(2) 燃料棒挙動解析計算

一次ループ熱水力解析計算により得られた炉心水位、炉心出口蒸気流量、炉心入口流量および炉心圧力を時間依存の境界条件として TOODEE 2-J1 (又は TOBUNRAD) によって燃料棒上端露出以降の計算を行う。露出開始時の燃料棒条件はループ熱水力解析計算での燃料棒条件を使用する。

この計算結果として PCT, COT が得られる。全炉心被覆管酸化量が必要な場合は大破断 LOCA の場合と同様に全炉心燃料を数群に分けてそれぞれに対して TOODEE 2 計算を行って、その結果を積分する。

2.3.3 BWR - 大破断 LOCA 解析

1. 使用コード

WREM-J2 コード・システムのうち発電用 BWR の大破断 LOCA 解析に使用できるのは次の 2 つである。

- (1) RELAP 4-EM (MOD 6/U4/J3)
- (2) MOXY-EM (MOD 32)。

2. コードの使用方法

BWR の一次系配管大破断による冷却材喪失事故 (LOCA) は大きくわけて、ブローダウン、再浸水、再冠水の 3 つの過程に分けて考えることができる。この LOCA 解析においては計算の主系列が 2 つあり、ひとつは系全体の熱水力学の挙動を解析するループ計算であり、もうひとつは最高出力チャンネル内の燃料棒の挙動を解析して最高被覆管温度 (PCT) と最高酸化層厚さ (COT) を求めるヒート・アップ計算である。後者の計算は前者の計算結果を束縛条件として遂行されるものである。これら 2 つの主系列の計算において各々のコードの分担する現象とその過程は Fig. 2.3.5 に示しており、解析計算における各コードの間のデータの授受を含む計算の流れは Fig. 2.3.6 に示したとおりである。

(1) 一次ループ熱水力解析計算

RELAP 4-EM を用いてブローダウン開始から再冠水終了までの一次ループ熱水力挙動を一貫して計算する。これにより系の減圧過程と水位変化を知ることができる。

(2) 燃料棒挙動解析計算

一次ループ熱水力計算結果を用いてホット・チャンネル計算を行うことによって下部プレナムフラッシング終了時刻 (EOLPF) - 下部プレナムフラッシング後に最高出力バンドルの最高出力位置のクォリティが 1.0 になった時刻で定義する - と、それまでのその位置での被覆管表面熱伝達係数 (HTC)、冷却材温度、規格化炉出力の時間依存の値が MOXY-EM の境界条件として使われる。更にスプレー流量定格到達時刻および再冠水時刻はループ計算の結果が使われる。MOXY-EM では EOLPF からスプレー流量定格到達時刻までを対流熱伝達は零、その後はスプレー熱伝達係数を用いて計算する。再冠水後は $25 \text{ Btu/hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ を用いる。この計算の結果として最高被覆管表面温度 (PCT) と酸化層厚さ (COT) を得ることができる。

最高出力バンドルの全体の酸化量が必要となきは、炉心下端から上端までの複数の高さでの MOXY-EM 計算を行い、それを積分する。更に炉心全体の酸化量が必要な場合は炉心全体の燃料棒集合体を出力ピーキング係数によって複数の群に分けて上記と同様のことをして積分すればよい。

2.3.4 BWR 一小破断 LOCA 解析

1. 使用コード

WREM-J2 コードシステムのうち BWR 一小破断 LOCA 解析に使用できるのは次の 2 つである。

- (1) RELAP 4-EM (MOD 6/U4/J3)
- (2) MOXY-EM (MOD 32)

2. コードの使用方法

BWR の一次系配管小破断による冷却材喪失事故 (LOCA) は炉心露出時も含めて減圧過程が続くのでブローダウン相のみと考えることができる。

計算の系列は 2 つあり、ひとつは一次系全体の熱水力的挙動を解析するループ解析計算でありもうひとつは最高出力チャンネル内の燃料棒の挙動を解析して PCT と COT を求めるヒート・アップ計算である。

これら 2 つの主系列の計算において各々のコードの分担する現象とその過程は Fig. 3.2.7 に示してあり、解析計算における各コードの間のデータの授受を含む計算の流れは Fig. 3.2.8 に示したとおりである。

(1) 一次系ループ熱水力解析計算

基本的には大破断 LOCA 解析の場合と同じである。

(2) 燃料棒挙動解析計算

被覆管表面温度計算上着目すべき炉心内高さが水位低下により蒸気中に露出するまでは、ループ計算によって得られた被覆管表面熱伝達係数、冷却材温度、炉出力を用いて解析する。

露出後は炉心飽和温度、炉出力の時間変化の値をループ計算の結果を用い、露出してから炉心スプレー流量が定格に達するまでは対流熱伝達は零とし、定格到達後は飽和温度へのスプレー熱伝達係数 1.5, 3.0, 3.5 Btu/hr·ft²·F を使用する。水位が回復した後は 25 Btu/hr·ft² F を用いる。

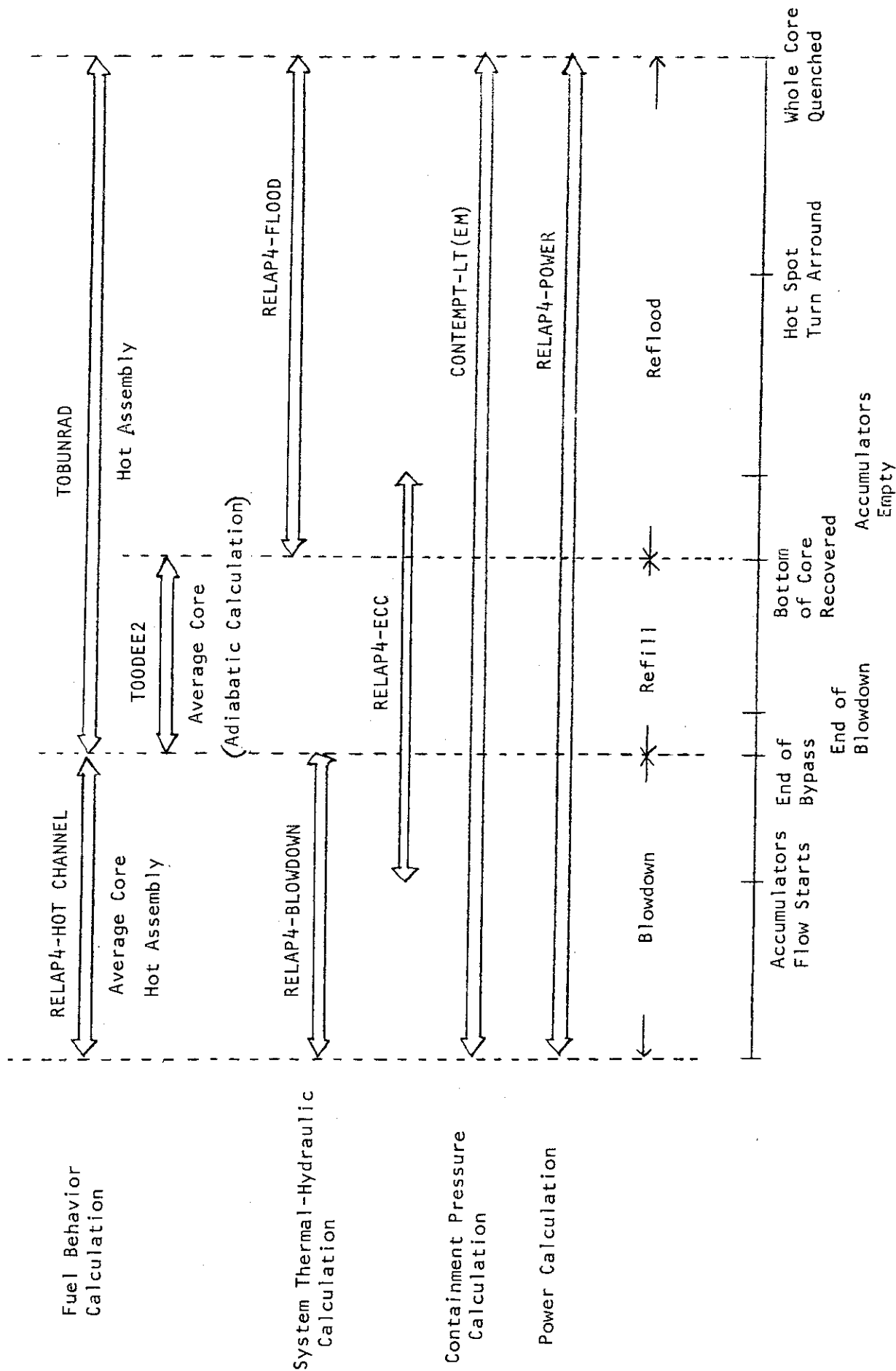


Fig. 2.3.1 Series of Calculations in Analysis of PWR Large Break LOCA by Using WREM-J2

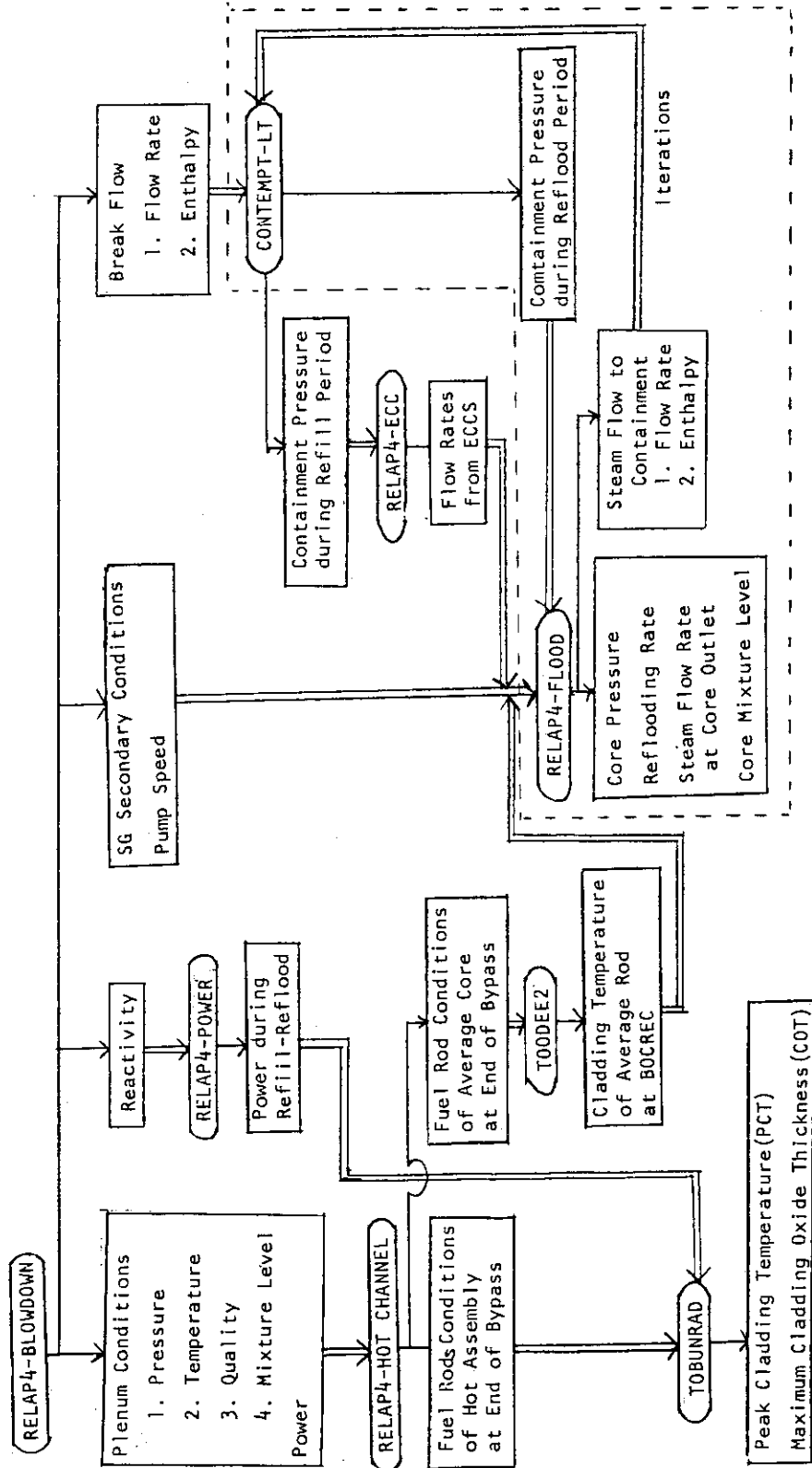


Fig. 2.3.2 Flow Chart of Analysis of PWR Large Break LOCA by Using WREM-J2

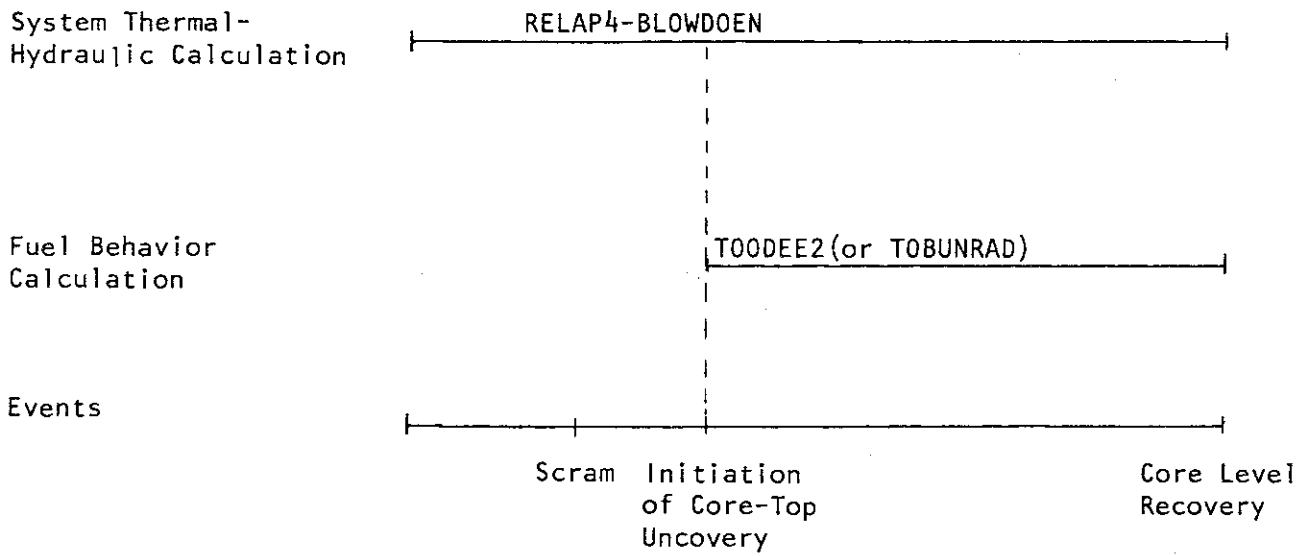


Fig. 2.3.3 Series of Calculations in Analysis of PWR Small Break LOCA

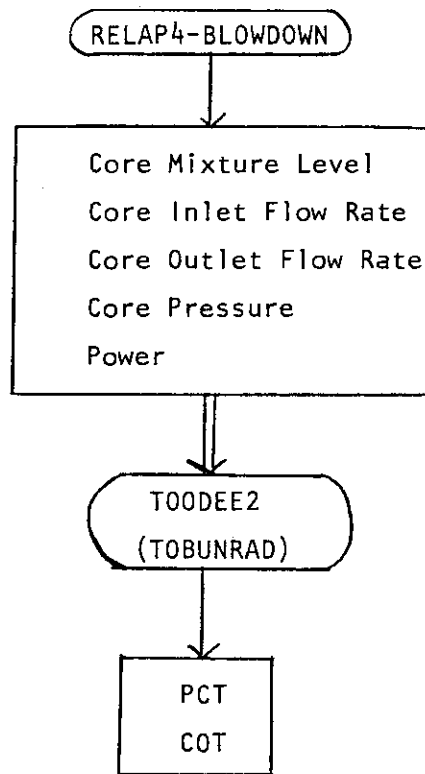


Fig. 2.3.4 Flow Chart of Analysis of PWR Small Break LOCA by Using WREM-J2

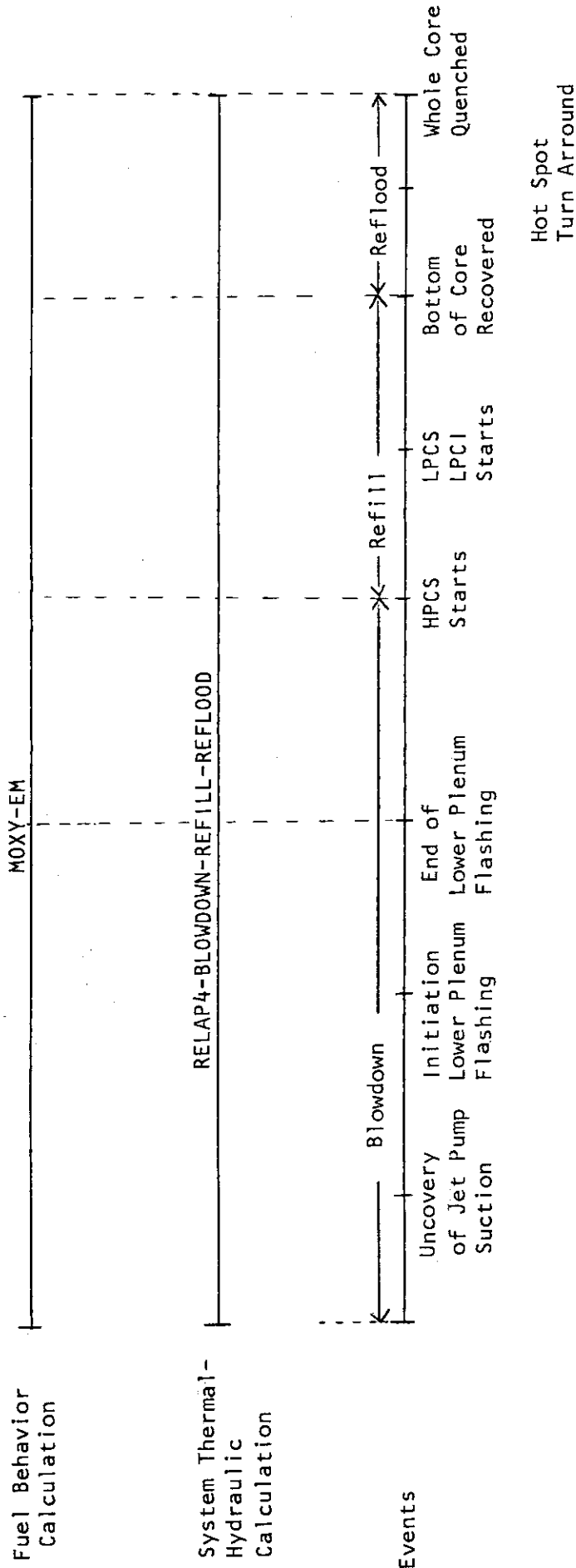


Fig. 2.3.5 Series of Calculations in Analysis of BWR Large Break LOCA by Using WREM-J2

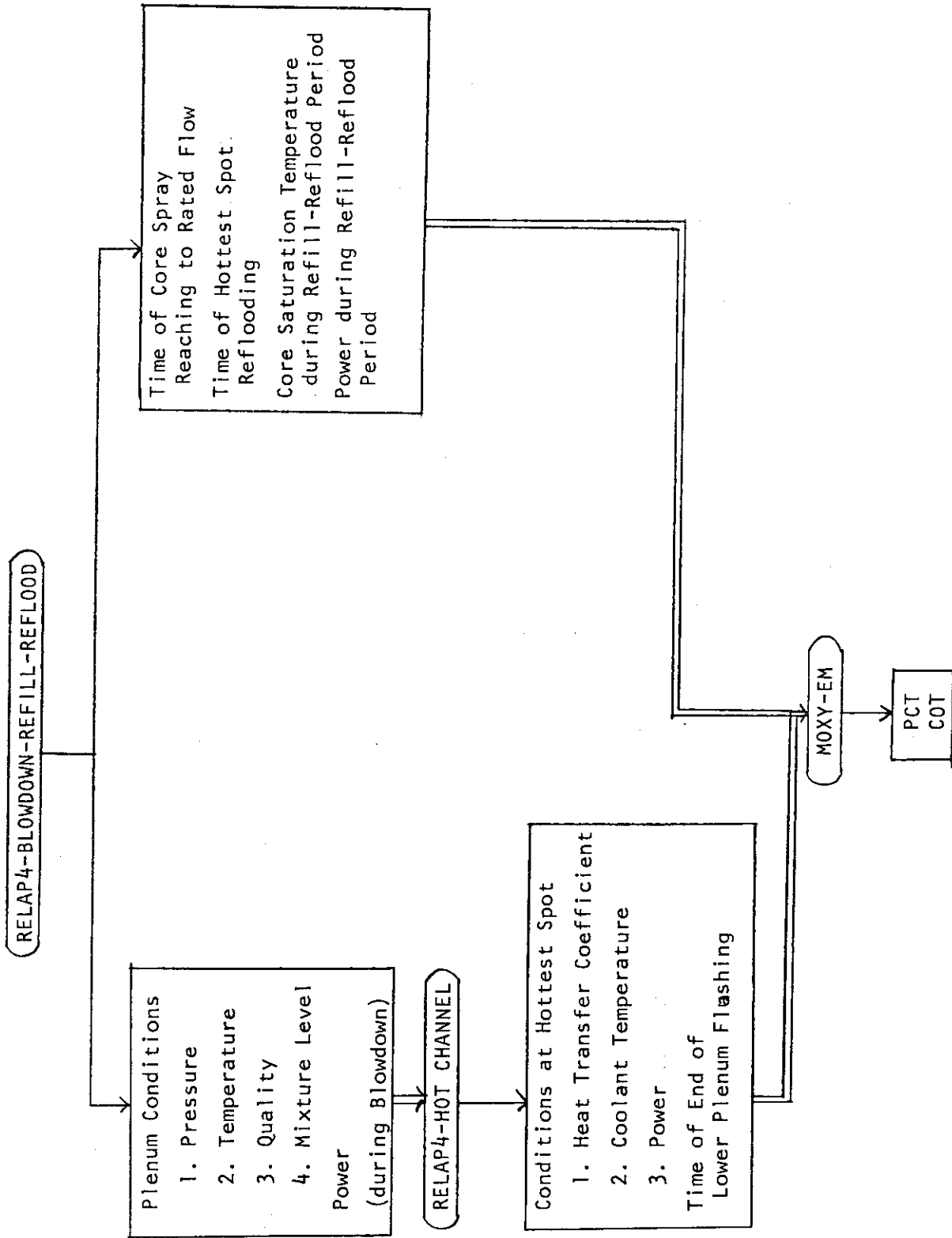


Fig. 2.3.6 Flow Chart of Analysis of BWR Large Break LOCA by Using WREM-J2

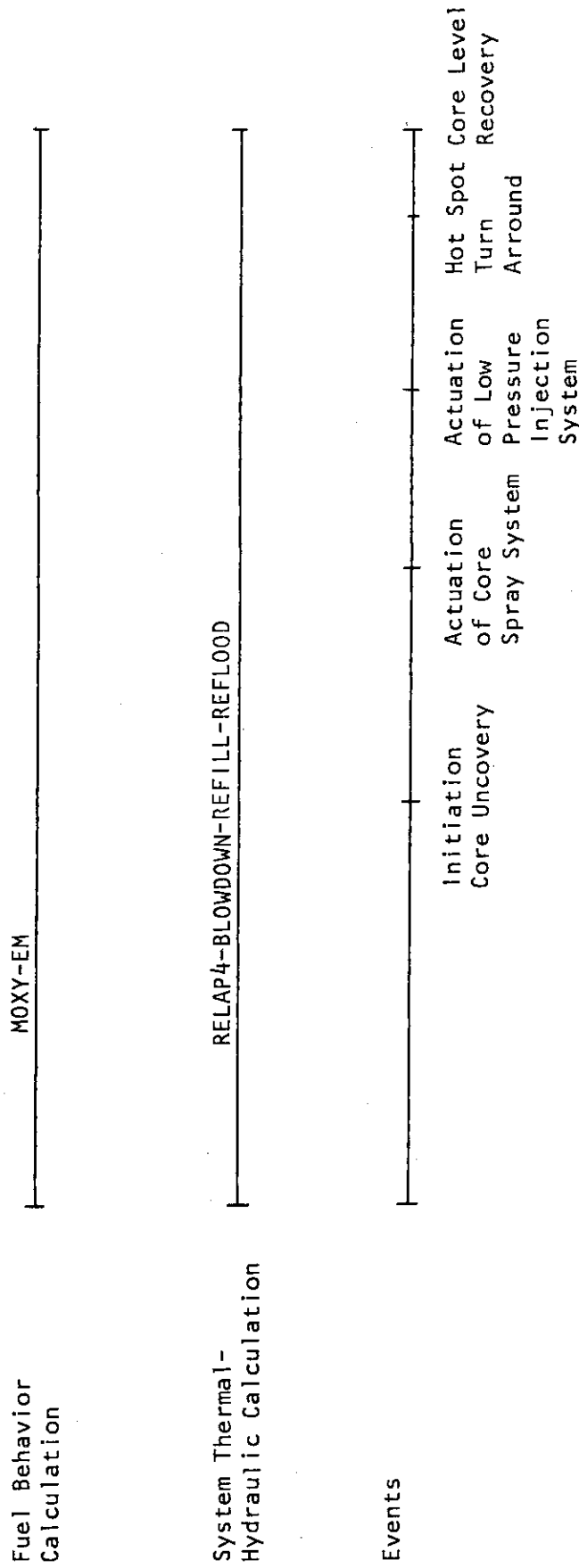


Fig. 2.3.7 Series of Calculations in Analysis of BWR Small Break LOCA by Using WREM-J2

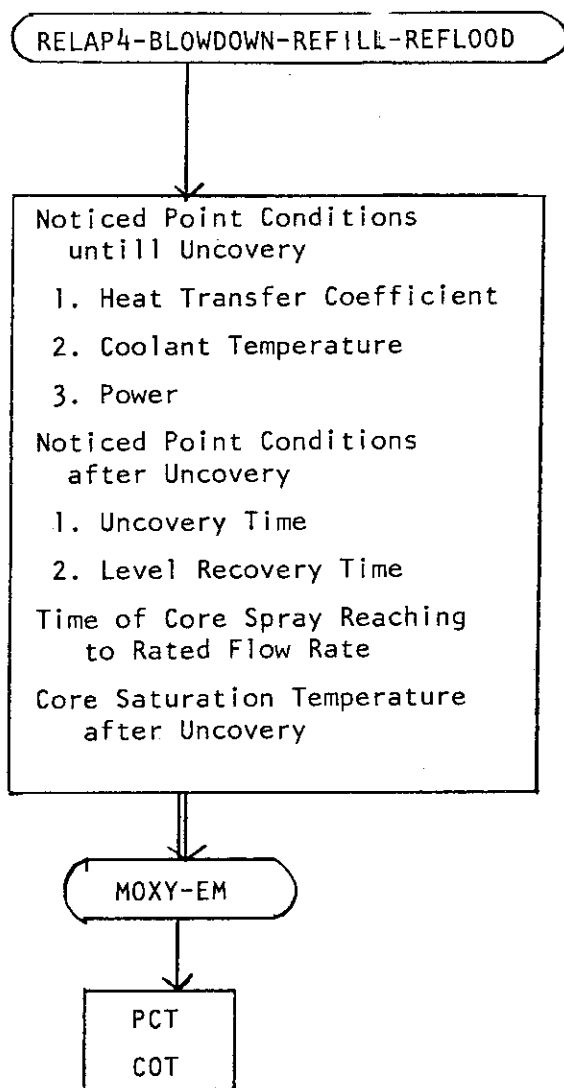


Fig. 2.3.8 Flow Chart of Analysis of BWR Small Break LOCA by Using WREM-J2

3. WREM - J 2のための改良・修正

WREM-J 2 コード・システムを構成するコードのうち TOBUNRAD, RELAP 4/MOD 6/U 4/J 3, RELAP/REFLA, RELAP 4-EM/SUS, および TOODEE 2/SUS についての報告はそれぞれ独立に JAERI - M レポートとして公刊済みか、又は刊行予定である。そのためここでは独立に公刊の予定はないが重要と思われる WREM - J 2 コード・システムのための改良点を記述する。

3.1 RELAP 4の改良

3.1.1 気泡離脱モデルの改良

3.1.1.1 はじめに

RELAP 4/MOD 5 の気泡離脱モデルでは、気泡離脱速度は入力で一定値を与える形式をとっており、その値は経験的に 3ft/sec が適当とされている。しかし、気泡離脱速度を Wilson の相関式²⁷⁾から求めた方がより実験に近いことが実験解析でわかっている。小破断解析では、水位が大きな役割をしめるのでより適切に水位を計算するために、RELAP 4/MOD 5 に Wilson の相関式を組み込むことにした。

3.1.1.2 改造の内容

i) 入力に関する内容

Wilson の相関式により気泡離脱速度を求めるオプションは、ボリュウムデータの IBUB を負にすることによって指定し、気泡密度勾配は、バブルデータの |IBUB| 番目のデータで指定するように変更した。

ii) Wilson の相関式による気泡離脱速度の計算

Wilson の相関式を以下に示す。

$$\alpha = C_1 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.32} \left(\frac{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g}}}{d} \right)^{0.19} \left(\frac{V_{BUB}}{g \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g}}} \right)^{0.05} C_2$$

..... (3.1.1)

- V_{BUB} : 気泡離脱速度 (ft/sec)
- α : 気液混合相のボイド率
- ρ_f : 液相密度 (lb_m/ft³)
- ρ_g : 気相密度 (lb_m/ft³)
- d : 熱水力学的等価直径 (ft)
- σ : 表面張力 (lb_f/ft)

g : 重力加速度 (ft/sec²)

$$C_1 = 0.136 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ただし } \frac{\alpha}{\left(\frac{\rho_g}{\rho_f - \rho_g} \right)^{0.32} \left(\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g}} \frac{1}{d} \right)^{0.19}} \leq 28408$$

$$C_2 = 1.78$$

$$C_1 = 0.75 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ただし } \text{同 上} \leq 28408$$

$$C_2 = 0.78$$

$$\sigma = 1.2 \times 10^{-5} \cdot (500 - 0.707 T_{\text{sat}}) \text{ lb}_f/\text{ft}$$

T_{sat} : 飽和温度 (°F)

以上より、気泡離脱速度 : V_{BUB} を求めるには、

$\alpha, \rho_f, \rho_g, d, T_{\text{sat}}$

が必要であり、式は比較的単純であるから、新たに以下に示すようなサブルーチンを作成した。

FUNCTION WLSNV (I, X, VF, VG, TSAT, DEQV)

X : 気液混合相クォリティ

VF : 液相比容積 (ft³/lb)

VG : 気相比容積 (ft³/lb)

TSAT : 飽和温度 (°F)

DEQV : 水力学的等価直径 (ft)

I : ボリューム番号

iii) 気泡離脱速度計算の Implicit 化

ii) の (3.1.1) 式で示したように、 V_{BUB} は α の依存性が強く、気液混合相より気泡が離脱したときの前後の V_{BUB} の変化は大きい。したがって、気泡離脱の式を V_{BUB} に関して Implicit に取り扱うほうが計算が安定する。気泡離脱の式は次のとおりである。

$$\dot{M}_B = \dot{M}_S - \sum_j \phi_j V_j W_j - A \rho_{\text{top}} V_{\text{BUB}} \quad \dots\dots (3.1.2)$$

M_B : 気液混合相内の気泡質量 (lb)

M_S : ボリューム内の全蒸気量 (lb)

ϕ_j : ボリューム内の蒸気相部に出入するジャンクションの流れのうち蒸気の占める割合。

X_j : ジャンクションクォリティ

W_j : ジャンクション流量 (lb/sec)

A : ボリュームの水平断面積 (ft²)

ρ_{top} : 気液混合相表面の気泡密度 (lb/ft³)

V_{BUS} : 気泡離脱速度 (lb/sec)

(3.1.2) 式をImplicitに差分化すると

$$\begin{aligned} & \frac{M_B(t + \Delta t) - M_B(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{M_S(t + \Delta t) - M_S(t)}{\Delta t} - \sum_j \phi_j(t + \Delta t) X_j(t + \Delta t) W_j(t + \Delta t) \\ & \quad - A \rho_{top}(t + \Delta t) V_{BUB}(t + \Delta t) \dots\dots\dots (3.1.3) \end{aligned}$$

となる。上式において

$$\begin{aligned} M_B(t + \Delta t) &= M_B(t) + \Delta M_B \\ M_S(t + \Delta t) &= M_S(t) + \Delta M_S \\ \rho_{top}(t + \Delta t) &= \rho_{top}(t) + \Delta \rho_{top} = \rho_{top} + \Delta \rho_{top} \\ V_{BUB}(t + \Delta t) &= V_{BUB}(t) + \Delta V_{BUB} = V_{BUB} + \Delta V_{BUB} \\ W_j(t + \Delta t) &= W_j' \\ \phi_j(t + \Delta t) &= \phi_j' \\ X_j(t + \Delta t) &= X_j' \end{aligned}$$

とおく (3.1.3) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_B}{\Delta t} &= \frac{\Delta M_S}{\Delta t} - \sum_j \phi_j' X_j' W_j' - A (\rho_{top} + \Delta \rho_{top}) (V_{BUB} + \Delta V_{BUB}) \\ &= \frac{\Delta M_S}{\Delta t} - \sum_j \phi_j' X_j' W_j' - A \rho_{top} V_{BUB} - A (\Delta \rho_{top} V_{BUB} + \rho_{top} \Delta V_{BUB}) \\ DM_B &= \frac{\Delta M_S}{\Delta t} - \sum_j \phi_j' X_j' W_j' - A \rho_{top} V_{BUB} \text{とおくと} \end{aligned}$$

$$\Delta M_B = DM_B \cdot \Delta t - \Delta t A (\Delta \rho_{top} V_{BUB} + \rho_{top} \Delta V_{BUB}) \dots\dots\dots (3.1.4)$$

上式 (3.1.4) において DM_B , V_{BUB} , ρ_{top} は既知である。

ρ_{top} は気液混合相のボイド率 $\bar{\alpha}$ および蒸気の密度 ρ_g を用いて次のように表わせる。

$$\rho_{top} = \rho_g (C_0 \bar{\alpha} + C_1)$$

上式を差分化して (Δt 間で ρ_g は一定とする。)

$$\Delta \rho_{top} = C_0 \rho_g \Delta \bar{\alpha} \dots\dots\dots (3.1.5)$$

また、気泡質量： M_B は次のように表わせる。

$$\Delta M_B = A Z_m \bar{\alpha} \rho_g$$

Z_m : 気液混合相水位

この差分は (Δt 間で ρ_g は一定とする。)

$$\Delta M_B = A \rho_g (\Delta Z_m \bar{\alpha} + Z_m \Delta \bar{\alpha}) \dots\dots\dots (3.1.6)$$

さらに液相の体積は

$$V_l = A Z_m (1 - \bar{\alpha})$$

これより

$$\begin{aligned} \Delta V_l &= A \{ \Delta Z_m (1 - \bar{\alpha}) - Z_m \Delta \bar{\alpha} \} \\ \Delta Z_m &= \frac{1}{A (1 - \bar{\alpha})} (\Delta V_l + Z_m A \Delta \bar{\alpha}) \dots\dots\dots (3.1.7) \\ &\quad (\Delta V_l \text{ は既知}) \end{aligned}$$

(3.1.7) を (3.1.6) に代入して

$$\Delta \dot{M}_B = \frac{\rho_g}{1 - \bar{\alpha}} (\bar{\alpha} \Delta V_l + A Z_m \Delta \bar{\alpha}) \dots\dots\dots (3.1.8)$$

(3.1.1) 式より V_{BUB} は

$$V_{BUB} = N_0 \bar{\alpha}^{N_1}$$

と表わされ、これを差分すると

$$\begin{aligned} \Delta V_{BUB} &= N_0 N_1 \Delta \bar{\alpha} \bar{\alpha}^{N_1-1} = \frac{N_1 \Delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} N_0 \bar{\alpha}^{N_1} = \frac{N_1 \Delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} V_{BUB} \\ &\dots\dots\dots (3.1.9) \end{aligned}$$

(3.1.5), (3.1.8), (3.1.9) を (3.1.4) に代入すると

$$\begin{aligned} &\frac{\rho_g}{1 - \bar{\alpha}} (\bar{\alpha} \Delta V_l + A Z_m \Delta \bar{\alpha}) \\ &= D M_B \Delta t - A \Delta t (C_0 \rho_g V_B \Delta \alpha + \rho_{top} \frac{\Delta \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} N_1 V_B) \\ \Delta \alpha \left\{ \frac{A Z_m \rho_g}{1 - \bar{\alpha}} + A \Delta t V_B (C_0 \rho_g + \rho_{top} N_1 \frac{1}{\bar{\alpha}}) \right\} &= D M_B \Delta t - \frac{\bar{\alpha} \rho_g}{1 - \bar{\alpha}} \Delta V_l \end{aligned}$$

{ } = K として

$$\Delta \bar{\alpha} = \frac{1}{K} (D M_B \Delta t - \frac{\bar{\alpha} \rho_g}{1 - \bar{\alpha}} (\Delta V_l)) \dots\dots\dots (3.1.10)$$

(3.1.10) 式より $\Delta \bar{\alpha}$ を求め、それを (3.1.8) に代入すれば ΔM_B が求まり、 $M_B(t + \Delta t)$ も求まる。

具体的には、サブルーチン“BAL”に(3.1.10.)、(3.1.8.)を追加し、さらに $\bar{\alpha}(t)$ 、 $M_B(t)$ 、 $V_1(t)$ を記憶するための領域を新たに設けた。

IV) エディットおよびテープ出力に関する改良

V_{BUB} 、 $\bar{\alpha}$ をマイナーエディット、メジャーエディットおよびプロッタに出力できるように改良を行った。さらに、スリップジャンクションの液相、気相の流速および流量に関しても、同様なことができるようにした。変更サブルーチンはEDIT、INEDIT、EDINED、EDEDIT、PLTAPEである。また V_{BUB} 、 $\bar{\alpha}$ を記憶するCOMMON;BUBBLVをサブルーチン;BAL、EDIT、PLTAPE、に追加した。変更追加した変数は以下の通りである。

○削除した変数

FV : ジャンクション流速 (流路面積が時間依存のジャンクションのみ)

JK : ジャンクションの比運動エネルギー (流路面積が時間依存のジャンクションのみ)

○マイナーエディットとプロット出力のみ可能であったものを、テープエディットも可能にした変数。

AM : 空気の質量 [lb]

PC : 燃料棒内圧 [psia]

TP : 燃料棒プレナムガス温度 [°F]

○新たに追加した変数

VB : 気泡離脱速度 [ft/sec]

MA : 気液混合相平均ボイド率

MX : 気液混合相平均クオリティ

LV : ジャンクション液相速度 [ft/sec]

GV : ジャンクション気相速度 [ft/sec]

LW : ジャンクション液相流量 [lb/sec]

GW : ジャンクション気相流量 [lb/sec]

V) 変速サブルーチン一覧

BAL	DATC	EDEDIT
EDINED	EDIT	INEDIT
INVOL	PLTAPE	PREW
VAPOR 1	WLSNV (新規作成)	

3.1.2 小破断解析のための改良

3.1.2.1 はじめに

PWR, BWRをとわず小破断解析においては、炉心水位が燃料棒温度を決める上で大きな役割を果たす。したがって水位計算をより適切に取扱う必要がある。ここで報告する内容は、小破断解析を行う過程で圧力容器内水位の変化の計算をより現実に近いものにするためと、垂直スリップジャンクションモデルをより矛盾の少ないものにするために行ったRELAP 4/MOD 5のプログラム修正と修正前、後の計算の比較である。修正したのはRELAP 4/MOD 5とMOD 6である。

3.1.2.2 プログラムの修正

i) 気泡離脱速度をWilsonの相関式で計算するための修正

前節参照

ii) スタッキングオプションを用いたときの水位計算の修正

オリジナルプログラムでは,次に示すような方法で水位が求められる。

まず気泡離脱モデルに基づき,各ボリュームの水位が他のボリューム条件と関係なく求められる (Fig. 3.1.1 参照)。この水位を ZM_i , ZM_k とする。スタッキングオプションを用いるとさらに次のような操作が行われる。

Fig. 3.1.1

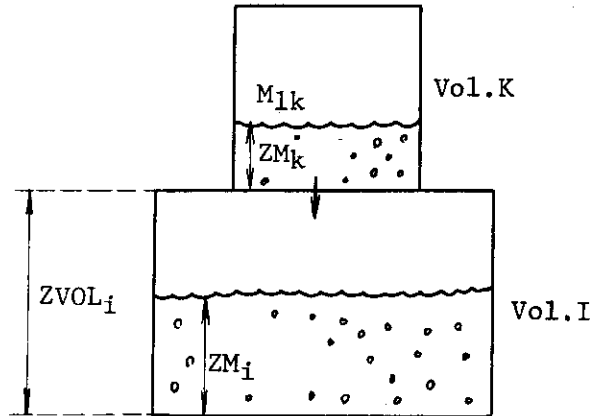


Fig. 3.1.1 Mixture Level Calculations in Stacked Volumes

$$Z' = \frac{2 M_{ik}}{\rho_i A_i}$$

M_{ik} : ボリューム k 内の液相水の質量

$$A_i = V_i / ZVOL_i$$

V_i : ボリューム I の体積

$ZVOL_i$: ボリューム I の高さ

$\bar{\rho}_i$: ボリューム I の平均密度

上式で求めた Z' より ZM_i を再計算する。

$$ZM_i \leq ZM_i + Z' \leq ZJ_i \quad \text{なら} \quad ZM'_i = ZM_i + Z'$$

$$ZJ_i \leq ZM_i + Z' \quad \text{なら} \quad ZM'_i = ZJ_i$$

さらに

$$ZM'_i > ZVOL_i \quad \text{なら} \quad ZM'_i = ZVOL_i$$

新たに求められた水位 ZM'_i より, ボリューム I の気液混合相の状態を求める。

$$MIXV_i = ZM'_i \cdot A_i$$

$MIXV_i$: ボリューム I 内の気泡混合相の体積

$$BUBM_i = M_{gi} - (V_i - MIXV_i) / SATVG_i$$

M_{gi} : ボリューム I 内の蒸気量

$SATVG_i$: ボリューム I 内の飽和蒸気の比体積

$$MIXQ_i = BUBM_i / (BUBM_i + M_{li})$$

$MIXQ_i$: ボリューム I 内の気液混合相のクオリティ

以上がスタッキングオプションを用いたときのオリジナルプログラムの計算の流れである。この方法の問題点は炉心と下部プレナムのように、ボリュームの流路断面 (A_i) に大きな差がある場合、 $ZM_i < ZVOL_i$ となり、炉心、下部プレナムの両方に水位ができてしまう。

そこでこれをさけるために、スタッキングオプションを用いたときの計算を次のように修正した。

ボリューム k の水位が 0.05 ft 以上の場合、ボリューム I の水位 ZM_i は

$$ZM_i = ZVOL_i$$

として、 $MIXV_i$ 、 $BUBM_i$ 、 $MIXQ_i$ を求める。 $ZM_k < 0.05$ ft の場合は、何の操作も行わない。修正サブルーチンは "BAL" である。

iii) ジャンクションエンタルピーの平滑化の修正

複数個のボリューム間で連続的な水位の変化を計算する場合、ボリューム k とボリューム I の間を水位がよぎるとき (Fig. 3.1.2 参照)、ジャンクション J のエンタルピーが急変し、計算が不安定になる。これを避けるために、普通は、ボリューム I とボリューム k をオーバーラップしたノーディングにし、オーバーラップ部分でジャンクションエンタルピーの平滑化を行う方法をとっている。小破断解析の場合、この方法を用いると、スタッキングオプションとの関係で水位の変化が物理的に妥当でない計算になる。

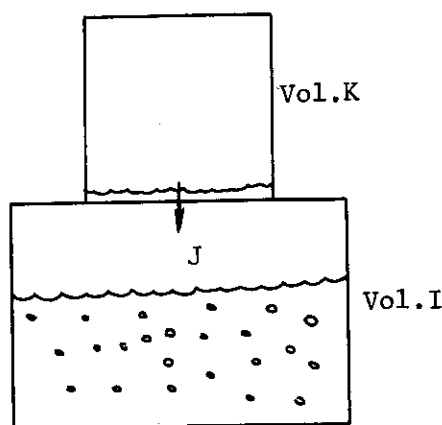


Fig. 3.1.2 Enthalpy Smoothing Calculation at Junction between Stacked Volumes

そこでジャンクションデータでDIAMJ(J) = 0, JVERTL(J) = 1を指定した場合, DIAMJ = 0.05 ft と仮定してエンタルピの平滑化を行うように修正した。修正サブルーチンは“BUBB”である。

iii) 垂直スリップジャンクションのスリップ速度の計算の修正

オリジナルプログラムでは次のようにスリップ速度を求めている (Fig. 3.1.3 参照)。

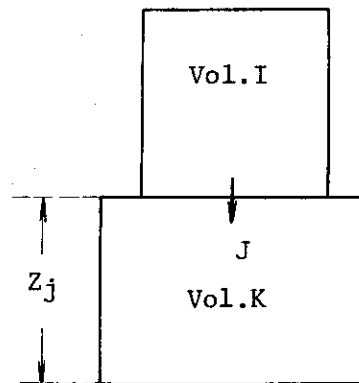


Fig. 3.1.3 Vertical Slip Velocity Calculation at Vertical Junction

$$AVEVS = \frac{GASV(I) + GASV(k)}{GASM(I) + GASM(k)}$$

$$AVEVL = \frac{LIQV(I) + LIQV(k)}{LIQM(I) + LIQM(k)}$$

$$SUMMS = GASM(I) + GASM(k) + LIQM(I) + LIQM(k)$$

$$AVX = \frac{GASM(I) + GASM(k)}{SUMMS}$$

$$ALPHA = \frac{AVEVS \cdot AVX}{AVEVL (1 - AVX) + AVEVS \cdot AVX}$$

$$ATOP = \frac{XTOP \cdot VS(I)}{VTOP}$$

$$ABOT = \frac{XBOT \cdot VS(k)}{VBOT}$$

$$VSLIP = \{10 + 4 \cdot (ABOT - ATOP)\} \cdot ALPHA \cdot (1 - ALPHA)^{(1 - 1.25 \cdot ALPHA)}$$

但し

GASV(I) : ボリューム I の蒸気相の体積

LIQV(I) : ボリューム I の液相相の体積

GASM(I) : ボリューム I の蒸気の質量

LIQM(I) : ボリューム I の液相の質量

AVEVS : ジャンクション J における 蒸気相の平均比容積

AVEVL : ジャンクションJにおける液相の平均比容積
 AVX : ジャンクションJにおける平均クオリティ
 ALPHA : ジャンクションJにおける平均ボイド率
 XTOP : ジャンクションJの上方近傍におけるクオリティ
 XBOT : ジャンクションJの下方近傍におけるクオリティ
 VTOP : ジャンクションJの上方近傍における比容積
 VBDT : ジャンクションJの下方近傍における比容積
 VS(I) : ボリュームIの蒸気相の体積
 VSLIP : ジャンクションJにおけるスリップ速度

上に示したようにジャンクションの平均ボイド率 (ALPHA) として、上下のボリュームの平均値を用いている。これは上下のボリュームの状態が均一の場合は妥当と思われるが、ボリュームIに水位がある場合は不適当である。したがってVSLIPを計算しているサブルーチン“VSLP”を次のように修正した。

ITOP : 上方のボリューム番号
 IBOT : 下方のボリューム番号
 RTOP : ジャンクションJの上方近傍における密度
 RBOT : ジャンクションJの下方近傍における密度

```

{ IF (GASM (ITOP) .LE. ZERO. AND. GASM (IBOT) .LE. ZERO) GO TO 250
{ IF (LIQM (ITOP) .LE. ZERO. AND. LIQM (IBOT) .LE. ZERO) GO TO 250
  ↓
{ IF (XTOP .LT. ZERO. AND. XBOT .LE. ZERO) GO TO 250
{ IF (XTOP .GE. ONE. AND. XBOT .GE. ONE) GO TO 250
{ IF (IAMBLD (IBOT) .EQ. ITOP. AND. XBOT .GE. ONE) GO TO 250

{ AVEVS = (GASV (ITOP) + GASV (IBOT)) / (GASM (ITOP) + GASM (IBOT))
{ AVEVL = (LIQV (ITOP) + LIQV (IBOT)) / (LIQM (ITOP) + LIQM (IBOT))
  ↓
{ AVEVS = (XTOP * RTOP * VS (ITOP) + XBOT * RBOT * VS (IBOT))
  / (XTOP * RTOP + XBOT * RBOT)
{ AVEVL = ((ONE - XTOP) * RTOP * VL (ITOP) + (ONE - XBOT) * RBOT *
  VL (IBOT)) / ((ONE - XTOP) * RTOP + (ONE - XBOT) * RBOT)

AVX = (GASM (ITOP) + GASM (IBOT))
  / (GASM (ITOP) + GASM (IBOT) + LIQM (ITOP) + LIQM (IBOT))
  ↓
AVX = (XTOP * RTOP + XBOT * RBOT) / (RTOP + RBOT)
  
```

3.1.2.3 プログラム修正前後の計算結果の比較

BWR 小破断解析用の例題を計算した結果を示す。この例題はRELAP 4/MOD 5のマニュアルに記載されているものをベースに、圧力容器内ノード間のオーバーラッピングを消去するように変更したものである。計算結果の代表的なものとして炉心、上下プレナム、炉心バイパスの水位

を示した。なお Fig. 3.1.4 ~ Fig. 3.1.7 は下部プレナムボリュームの底部の高さを基準にとり 4 つのノードの水位をひとつの図に示したものである。

まず Fig. 3.1.4 に示した水位はオリジナルプログラムで計算した結果である。Fig. 3.1.5 は Wilson の相関式を組み込みボリュームスタッキングオプションを修正したプログラムで計算した結果である。Fig. 3.1.6 はさらにジャンクションエンタルピの平滑化の方法に修正をほどこしたプログラムにより計算したものである。すなわち Fig. 3.1.7 が RELAP 4 / MOD 5 / U 2 / J 1 によって計算されたものである。

3.1.3 F.P. 崩壊熱評価部分の改良

3.1.3.1 はじめに

従来日本における商用発電炉の ECCS 性能評価解析において F.P. 崩壊熱として PWR では ANS $\times 12$, BWR では GE (平均) + 3 σ の値が使用されてきた。今後の BWR の解析においては GE (平均) + 3 σ の値を使用する必要がある。

RELAP 4 では F.P. 崩壊熱としては ANS の値のみしか使えないので、GE (平均) + 3 σ を計算できるように RELAP 4 を改造することとした。

3.1.3.2 GE (平均) + 3 σ F.P. 崩壊熱データの作成

GE (平均) + 3 σ F.P. 崩壊熱データを作成するにあたっては NEDO-10625²⁸⁾ を参考とした。ガンマエネルギー放出率 E_γ は NEDO-10625 の Table A 3, ベータエネルギー放出率 E_β は Table B 2 を使用し、 σ の値としては (D-1) の式

$$\sigma(t) = a_0 + a_1 \ln t + a_2 (\ln t)^2 + a_3 (\ln t)^3 + \dots + a_6 (\ln t)^6$$

$a_0 = 2536421$	$a_1 = -1336117 \times 10^{-1}$
$a_2 = -10176138 \times 10^{-6}$	$a_3 = 2706715 \times 10^{-2}$
$a_4 = -1979826 \times 10^{-3}$	$a_5 = 1662131 \times 10^{-5}$
$a_6 = -2067698 \times 10^{-6}$	

を使用して

$$GE(\text{平均}) + 3\sigma = (E_\gamma + E_\beta)(1 + 3\sigma/100)$$

によって計算される。

Table 3.1.2 の第 2 列, 第 3 列にそれぞれ E_γ , E_β を第 4 列には $(E_\gamma + E_\beta)$ を示してある。第 5 列には (D-1) により計算された σ の値を, そして最後の列には GE (平均) + 3 σ の値を表示する。また参考のため第 6 列, 第 7 列にそれぞれ GE (平均) + σ , GE (平均) + 2 σ の値を表示してある。

注) NEDO-10625 の Appendix C で与えられている実験の平均値は F.P. 崩壊熱にアクチニド崩壊熱を加えたものである。従って NEDO-10625 で与えられている GE (平均) + 2 σ の値はアクチニド崩壊熱の寄与も含むものである。

3.1.3.3 GE (平均) + 3 σ F.P. 崩壊熱データの指数関数の和によるフィッティング。

RELAP 4 は ANS の F.P. 崩壊熱データを下式のような 11 群の指数関数の和でフィッティングしている。

$$P_{fp}(t) = \sum_{j=1}^{11} E_j e^{-\lambda_j t} \quad \dots\dots\dots (3.1.3.1)$$

したがって GE + 3 σ の E.P. 崩壊熱データも、複数の指数関数の和でフィッティングすることにした。この方法を用いれば、プログラムの修正は容易である。

3.1 カーブフィッティングの方法

データ点は 0.1 秒 ~ 3 × 10⁶ 秒の間の 66 点であるが、0.1 秒の値が 0.2 秒の値より小さいので 0.1 秒のデータは除外し、計 65 点のデータについてカーブフィッティングを試みた。カーブフィッティングは、JSSL の FITGS を用いて行った。

◎ 手順

① 65 点のデータを 11 群にわけた。時間の大きいほうから順に 1 群、2 群、…… 11 群とし、1 ~ 10 群に含まれるデータ数は 60 点、11 群は 5 点とする。

② 1 群、2 群のデータに対して $E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ に適当な初期値を与え $E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ の最適値を求める。

③ ②のデータに 3 群のデータを加え、 $E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ は②で求めた値に固定して、 E_3, λ_3 の最適値を求める。

④ ③で求めた E_3, λ_3 および②で求めた $E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ を初期値として、 $E_1 \sim E_3, \lambda_1 \sim \lambda_3$ の最適値を求める。

⑤ ④のデータに 4 群を加え、 $E_1 \sim E_3, \lambda_1 \sim \lambda_3$ は④で求めた値に固定して、 E_4, λ_4 の最適値を求める。

⑥ ⑤で求めた E_4, λ_4 および④で求めた $E_1 \sim E_3, \lambda_1 \sim \lambda_3$ を初期値として $E_1 \sim E_4, \lambda_1 \sim \lambda_4$ の最適値を求める。

⑦ 以上の手順で 1 ~ 9 群のデータに対して $E_1 \sim E_9, \lambda_1 \sim \lambda_9$ を求め、さらに 10 群のデータを追加して E_{10}, λ_{10} を求めようとしたが計算が発散してしまうため、全データに対して、1 ~ 9 群のデータに関して求めた $E_1 \sim E_9, \lambda_1 \sim \lambda_9$ を初期値として新たに $E_1 \sim E_9, \lambda_1 \sim \lambda_9$ を求め、9 個の指数関数の和でフィッティングすることにした。

このようにして求められた E_j, λ_j を Table 3.1.3 に示し、Table 3.1.4 にデータと計算値の比較を示す。0.1 ~ 10000 秒の期間で 0.2% の精度で一致している。

3.1.3.4 プログラムの修正と使用方法

プログラム修正は、RELAP 4/MOD 3, RELAP 4/MOD 5, RELAP 4/MOD 6 について行った。

1)

オリジナル RELAP 4 には、炉心出力計算に関して 5 つのオプションが指定できるが、今回の修正では、さらに 2 つオプションを追加する形で GE + 3 σ での出力計算が可能になるようにした。追加したオプションは以下の通りである。

NODEL = 4

核分裂 + E.P. (GE + 3 σ)

NODEL = 5

核分裂 + F.P. (GE + 3 σ) + アクチニド

注) NODELとはRELAP 4の入力データのうち、カード番号140000において、出力計算のオプションを指定する変数である。詳細は各RELAP 4のバージョンのマニュアルを参照のこと。

修正サブルーチンは、INRKENのみであり、具体的な修正箇所はTable 3.1.5の下線をほどこした部分である。修正内容は、NODELに4あるいは5が入力された場合、オリジナルプログラム内の E_j , λ_j の値をTable 3.1.3の値に置きかえるものである。ただし、 E_{10} ・ E_{11} は $E_{10} = E_{11} = 0.0$ とし、 λ_{10} , λ_{11} はオリジナルプログラムの値のままである。

ii) 使用方法

Table 3.1.6に炉心出力計算のオプションの一覧表を示す。F.P.の崩壊熱をGE + 3 σ で計算する場合は

$$\begin{aligned} \text{NODEL} &= 4 \text{ または } 5 \\ \text{KMUL} &= 0 \end{aligned}$$

とすればよい。

NODEL = 4または5として、KMULも0とすると、入力チェックでエラー終了するようにしたのは、GE + 3 σ の値をさらに1.2倍にすることは意味がないからである。

4.3 チェック計算

(1) Fig. 3.1.8に大破断ケースに対応する反応度の時間変化を入力データとして、(a)核分裂のみ、(b)核分裂 + [GE + 3 σ]、(c)核分裂 + [GE + 3 σ] + アクチニド崩壊熱の4つのケースの規格化出力の計算値を示す。ケース(b)で100秒以降ではTable 3.1.4の[GE + 3 σ]の値とよく一致しており、またケース(c)では(b)の値にアクチニド崩壊熱の寄与として約0.3%を加えた値になっている。

(2) Fig. 3.1.9に小破断ケースに対応する反応度の時間変化を入力データとして、核分裂 + [GE + 3 σ] + アクチニド崩壊熱で計算した規格化出力を示す(ケース(e))。この場合は0 ~ 5秒の間は反応度が0から-0.1まで変化するので規格化出力もゆっくりと減少し、10秒で急激に負の反応度を挿入するので出力も急減する。

(3) Fig. 3.1.10にケース(f)とケース(g)を示す。ケース(g)の反応度の変化はケース(f)よりも100秒だけ遅らせている。すなわちケース(g)では100秒まで反応度は0.0である。ケース(g)の規格化出力は(f)の計算値よりも100秒だけずれた値になるはずであり、実際の計算でもそうなる。

3.1.3.5 ANS \times 1.2と GE + 3 σ を使用した場合の計算の比較

Fig. 3.1.11にPWRのNRC標準問題を用いて、F.P.崩壊熱としてANS \times 1.2を使用した場合とGE + 3 σ を使用した場合の比較をホットチャンネル平均出力燃料棒表面温度について行っている。7.4秒近傍の第1ピークでは245 °F、バイパス終了時(25秒)で25.5 °FだけGE + 3 σ を使用した方が低くなっている。

Table 3.1.1-(1) List of Modified and Added Statements for Improving Bubble Rise Model in RELAP4

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE BAL (NVOL,NJUN,NSLB,NCOR,IPROGM,IEMHT,IEMPS,IEMEC, 1 DT,STDATA)	BAL00010
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	BAL00020 BAL00030
42	C	COMMON / BUBBLV / BUBV(75), AMIX(75)	BAL03290 BAL03300 追加
43	C	DIMENSION BUBOLD(75),LIQOLD(75)	BAL03310
44		REAL*8 LIQOLD	BAL03320 追加
45	C	COMMON / COEF / C1(75), CV(75)	BAL03330 BAL03340 追加
59	C	DO 5 I=1,NVOL	BAL03560 BAL03570 追加
60	C	BUBOLD(I) = BUBM(I)	BAL03580 BAL03590 追加
61	C	LIQOLD(I) = LIQV(I)	BAL03595 BAL03600
62	C	IF (TIMEX .GT. ZERO) GO TO 5	BAL03605 追加
63		IF (IBUB(I).GE. 0) GO TO 5	BAL03610
64		IF (MIXQ(I).EQ. ZERO) GO TO 6	BAL03620
65		IF (MIXQ(I).EQ. ONE) GO TO 7	BAL03630 BAL03640
66	C	AMIX(I) = BUBM(I)*VS(I)/(BUBM(I)*VS(I) + LIQV(I))	BAL03650 追加
67		BUBV(I) = WLSNV(I,MIXQ(I),VL(I),VS(I),SATT(I),DIAMV(I))	BAL03660
68		GO TO 5	BAL03670 BAL03690
69	C	6 AMIX(I) = ZERO	BAL03700 追加
70		GO TO 5	BAL03715 BAL03716
71	C	7 AMIX(I) = ONE	BAL03717 追加
72	C	5 CONTINUE	BAL03720 BAL03730 追加

Table 3.1.1-(2)

	C	IF BUBBLE RISE VELOCITY IS ZERO, ALL GAS IS IN BUBBLES	BAL05800
	C	K = IBUB(I) + 1	BAL05810
238	C	K = IABS(IBUB(I)) + 1	BAL05820 変更
239		IF (VBUB(K)) 410,410,405	BAL05830
240	405	IF (WVBAR(I)*3600,-FLOWA(I)*2000000,) 420,420,410	BAL05840
241	410	BUBM (I) = GASM(I)	BAL05850
242		MIXQ (I) = AVEX(I)	BAL05860
243		MIXV (I) = V(I)	BAL05870
244		ZM (I) = ZVOL(I)	BAL05880
245		AMIX (I) = BUBM(I) * SATVG(I) / MIXV(I)	BAL05890 追加
246		GO TO 640	BAL05900 BAL05910
247	C	TEST FOR SPECIAL BOUNDARY VOLUMES	BAL05920
	C	420 IF (IREAD(I)) 440,430,440	BAL05930
	C	APPLY BUBBLE SEPARATION MODEL, REGARDLESS OF SLIP	BAL05940
	C	BUBM(T+1) = BUBM(T) + (GASM(T+1)-GASM(T)) - DT*VBUB*...	BAL05950
248	430	CONTINUE	BAL05960 BAL05970 追加
249	C	IF (IBUB(I).GE.0) GO TO 435	BAL05980
250		BUBCHK = WLSNV(I,MIXQ(I),VL(I),VS(I),SATT(I),DIAMV(I))	BAL05990 追加
251		IF (BUBCHK.GT.ONE .AND. BUBCHK.LT.TEN) GO TO 432	BAL06000
252		BUBV(I) = BUBCHK	BAL06001 BAL06002
253		GO TO 436	BAL06003 BAL06010
254	C	432 CONTINUE	BAL06015 追加
255		DBM = (GASM(I)+BUBM(I)-BUBOLD(I))/A(I) - RGBT(I)*BUBV(I)*DT	BAL06020
256		DVL = LIQV(I) - LIQOLD(I)	BAL06021
257		AAA = DBM - AMIX(I)*DVL/(VS(I)*A(I)*(ONE - AMIX(I)))	BAL06022
258		DAMIX = AAA/(ZM(I)/(ONE - AMIX(I))/VS(I) + DT*BUBV(I)* 1 (C1(I) + RGBT(I)*CV(I)/AMIX(I)))	BAL06030 BAL06040
259	1	BUBM(I) = BUBOLD(I) + (A(I)*ZM(I)*DAMIX + AMIX(I)*DVL)	BAL06050
260	1	/(VS(I)*(ONE - AMIX(I)))	BAL06055 BAL06060
	C	GO TO 437	BAL06070
	C	430 BUBM(I) = BUBM(I) + GASM(I) - DT*VBUB(K)*RGBT(I)*A(I)	BAL06140
261		435 BUBV(I) = VBUB(K)	BAL06150 変更
262		436 BUBM(I) = BUBM(I) + GASM(I) - DT*BUBV(I)*RGBT(I)*A(I)	BAL06160
263		437 CONTINUE	BAL06170
264		IF (ARMASS(I) .GT. ZERO) BUBM(I) = ZERO	BAL06180

Table 3.1.1-(3)

265		BUBM(I) = DMAX1(ZERO,DMIN1(GASM(I),BUBM(I)))	BAL06190
266		MIXQ(I) = BUBM(I) / (BUBM(I)+LIQM(I))	BAL06200
267		MIXV(I) = LIQV(I) + BUBM(I)*SATVG(I)	BAL06210
268		AMIX(I) = BUBM(I)*SATVG(I)/MIXV(I)	BAL06220 追加
269		IF (IBUB(I),LT.0)	BAL06230
		IBUBV(I) = WLSNV(I,MIXQ(I),VL(I),VS(I),SAT(I),DIAMV(I))	BAL06240
270		ZM(I) = MIXV(I) / A(I)	BAL06250
271		IF (ZM(I) *1.0000001D0 .GT. ZVOL(I)) ZM(I) = ZVOL(I)	BAL06260
272		GO TO 640	BAL06270
	C		BAL06280
	C	MIXTURE LEVEL KNOWN FROM CARDS OR TAPE	BAL06290
273	440	IF (ZM(I)-ZVOL(I)) 450,450,940	BAL06300
274	450	MIXV(I) = ZM(I) * A(I)	BAL06310
275		BUBM(I) = GASM(I) - (V(I)-MIXV(I))/SATVG(I)	BAL06320
276		BUBM(I) = DMAX1(BUBM(I),ZERO)	BAL06330
277		MIXQ(I) = BUBM(I) / (BUBM(I)+LIQM(I))	BAL06340
278		AMIX(I) = BUBM(I) * SATVG(I) / MIXV(I)	BAL06345 追加
	C		BAL06350
	C	CHECK FOR POSSIBLE SLIP FLOW ADJUSTMENTS	BAL06420
283	700	DO 750 I= 1, NVOL	BAL06430
	C	K = IBUB(I) + 1	BAL06440
284		K = IABS(IBUB(I)) + 1	BAL06450 変更
285		IF (VBUB(K),LE,ZERO) GO TO 750	BAL06460
286		IF (PHASE(I),NE,2) GO TO 750	BAL06470
287		K = IAMBLO(I)	BAL06480
288		IF (K,LE,0) GO TO 750	BAL06490
289		IF (LIQM(K),LE,ZERO) GO TO 750	BAL06500
	C		BAL06510

Table 3.1.1-(4)

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE VAPOR1(I)	VAP00010
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	VAP00020
	C	SUBROUTINE TO SET UP SLOPE AND INTERCEPT FOR CALC. OF PARTIAL	VAP00030
	C	DENSITIES OF GAS BUBBLES AND MIXTURE TO BE USED IN BUBBL1.	VAP00040
	C	RETURNS ALSO PARTIAL DENSITY OF BUBBLES AT SURFACE	VAP00050
	C		VAP00390
7		COMMON / COEF / C1(75), CV(75)	VAP00392 追加
	C		VAP00394
8		DATA ZERO, HALF, ONE, TWO / 0.00, 0.500, 1.00, 2.00 /	VAP00398
	C		VAP00500
	C	TWO PHASE MIXTURE	VAP00510
	C	30 K = IBUB(J) + 1	VAP00520 変更
17	30	K = IABS(IBUB(J)) + 1	VAP00525
18		VM = LIQM(J)*VL(J) + BUBM(J)*VS(J)	VAP00530
19		G = BUBM(J) / VM	VAP00540
20		GT = (BUBM(J)+LIQM(J)) / VM	VAP00550
21		IF (G*VS(J)-HALF) 40,40,50	VAP00560
22	40	C = ALPH(K) * G	VAP00570
23		D = ALPH(K) * (GT-ONE/VS(J))	VAP00580
24		C1(J) = (ONE + ALPH(K))/VS(J)	VAP00585 追加
25		GO TO 60	VAP00590
26	50	C = ALPH(K) * (ONE/VS(J)-G)	VAP00600
27		D = ALPH(K) * (ONE/VS(J)-GT)	VAP00610
28		C1(J) = (ONE - ALPH(K))/VS(J)	VAP00615 追加
29	60	A1(J) = TWO * C	VAP00620
30		B(J) = G - C	VAP00630
31		E(J) = TWO * D	VAP00640
32		F(J) = GT - D	VAP00650
33		GO TO 80	VAP00660

Table 3.1.1-(5)

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		FUNCTION WLSNV (I , X , VF , VG , TSAT , DEQV)	00000010 新規作成
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	00000020
	C		00000030
	C	THIS FUNCTION SUBROUTINE CALCULATES BUBBLE RISE VELOCITY USING	00000040
	C	WILSON CORRELATION	00000050
	C		00000060
	C	I = VOLUME INDEX	00000070
	C	X = MIXTURE QUALITY	00000080
	C	VF = LIQUID SPHECIFIC VOLUME AT SATURATION TEMP (FT3/LB)	00000090
	C	VG = VAPOR SPHECIFIC VOLUME AT SATURATION TEMP (FT3/LB)	00000100
	C	TSAT = SATURATION TEMPERATURE (F)	00000110
	C	DEQV = EQUIVALENT DIAMETER OF FLOW AREA (FT)	00000120
	C	WLSNV = BUBBLE RISE VELOCITY (FT/SEC)	00000130
	C		00000140
3		DIMENSION C1(2) , C2(2)	00000150
	C		00000160
4		COMMON / XUNITS / A , B , C , D , E , F , G , H , O , P , Q , R	00000170
	C		00000180
	C	G = GRAVITY ACCELERATION CONST (FT/SEC2)	00000190
	C		00000200
5		COMMON / COEF / C0(75) , CV(75)	00000210
	C		00000220
6		DATA C1 , C2 / ,136D0 , ,75D0 , ,1.78D0 , ,78D0 /	00000230
7		DATA F1 , F2 / ,32D0 , ,19D0 /	00000240
8		DATA V1 , V2 , V3 /12,D-6 , ,5.0D2 , ,707D0 /	00000250
9		DATA ONE , TEN /1.0D0 , ,10.0D0 /	00000260
	1	,BNDRY /2.84085259824276670D0 /	00000270
	C		00000280
	C	ALPHA = VOID FRACTION IN MIXTURE	00000290
	C	RHOF = LIQUID DENSITY (LB/FT3)	00000300
	C	RHOG = VAPOR DENSITY (LB/FT3)	00000310
	C	SIGMA = BUBBLE SURFACE TENSIN (LBF/FT)	00000320
	C		00000330

Table 3.1.1-(6)

10		ALPHA = X * VG / (X * VG + (ONE - X) * VF)	00000340
11		RHOF = ONE / VF	00000350
12		RHOG = ONE / VG	00000360
13		SIGMA = V1 * (V2 - V3 * TSAT)	00000370
	C		00000380
14		A0 = DSQRT (SIGMA / (RHOF - RHOG))	00000390
15		A1 = (RHOG / (RHOF - RHOG)) ** F1	00000400
16		A2 = (A0 / DEQV) ** F2	00000410
	C		00000420
17		AAA = ALPHA / A1 / A2	00000430
	C		00000440
18		IRGN = 1	00000450
19		IF (AAA , GT , BNDRY) IRGN = 2	00000460
	C		00000470
20		CV(I) = ONE / C2(IRGN)	00000480
21		WLSNV = (AAA / C1(IRGN)) ** CV(I) * DSQRT (G * A0)	00000490
	C		00000500
22		IF (WLSNV , LT , ONE) WLSNV = ONE	00000510
23		IF (WLSNV , GT , TEN) WLSNV = TEN	00000520
	C		00000530
24		RETURN	00000540
25		END	00000550

Table 3.1.2-(1) A Sample Input Data for RELAP/REFLA Plotter Program (Case I)

TIME	E_{γ} GAMMA	E_{β} BETA	$E_{\alpha} + E_{\theta}$ EXPM	σ SGM	$G_{E(\frac{E_{\beta}}{E_{\gamma}})} + SGM$	$G_{E(\frac{E_{\alpha} + E_{\theta}}{E_{\gamma}})} + 2SGM$	$G_{E(\frac{E_{\beta}}{E_{\gamma}})} + 3SGM$
0.10	3.3360000E-02	3.5800000E-02	6.9159999E-02	1.9176835E+00	7.0486272E-02	7.1812544E-02	7.3138814E-02
0.20	3.2990000E-02	3.5400000E-02	6.8390001E-02	2.3616012E+00	7.0005100E-02	7.1620198E-02	7.3235298E-02
0.30	3.2690000E-02	3.5000000E-02	6.7690000E-02	2.4983437E+00	6.9381129E-02	7.1072258E-02	7.2763387E-02
0.40	3.2430000E-02	3.4700000E-02	6.7129999E-02	2.5511824E+00	6.8842608E-02	7.0535218E-02	7.2267825E-02
0.50	3.2180000E-02	3.4300000E-02	6.6480001E-02	2.5706685E+00	6.8188982E-02	6.9897963E-02	7.1606943E-02
0.60	3.1960000E-02	3.3900000E-02	6.5860001E-02	2.5743761E+00	6.7555485E-02	6.9250969E-02	7.0946453E-02
0.70	3.1740000E-02	3.3600000E-02	6.5339999E-02	2.5698709E+00	6.7019153E-02	6.8698306E-02	7.0377460E-02
0.80	3.1540000E-02	3.3200000E-02	6.4740000E-02	2.5608629E+00	6.6397903E-02	6.8058805E-02	6.9713708E-02
0.90	3.1330000E-02	3.2900000E-02	6.4250000E-02	2.5493369E+00	6.5887948E-02	6.7525897E-02	6.9163846E-02
1.00	3.1170000E-02	3.2500000E-02	6.3670000E-02	2.5364210E+00	6.5284939E-02	6.6899879E-02	6.8514818E-02
2.00	2.9710000E-02	2.9800000E-02	5.9510000E-02	2.4034768E+00	6.0940309E-02	6.2370618E-02	6.3800927E-02
3.00	2.8630000E-02	2.7800000E-02	5.6450000E-02	2.2998492E+00	5.7748265E-02	5.9046530E-02	6.0344795E-02
4.00	2.7820000E-02	2.6300000E-02	5.4120000E-02	2.2205294E+00	5.5321751E-02	5.6523502E-02	5.7725252E-02
5.00	2.7130000E-02	2.5100000E-02	5.2230000E-02	2.1575618E+00	5.3356895E-02	5.4483790E-02	5.5610684E-02
6.00	2.6530000E-02	2.4100000E-02	5.0650001E-02	2.1059954E+00	5.1716686E-02	5.2783372E-02	5.3850058E-02
7.00	2.6040000E-02	2.3300000E-02	4.9340000E-02	2.0627269E+00	5.0357750E-02	5.1375499E-02	5.2393248E-02
8.00	2.5600000E-02	2.2700000E-02	4.8300000E-02	2.0257334E+00	4.9278429E-02	5.0256859E-02	5.1235287E-02
9.00	2.5200000E-02	2.2100000E-02	4.7300001E-02	1.9936234E+00	4.8242984E-02	4.9185968E-02	5.0128959E-02
10.00	2.4840000E-02	2.1600000E-02	4.6440001E-02	1.9654088E+00	4.7352737E-02	4.8265472E-02	4.9178208E-02
20.00	2.2420000E-02	1.8400000E-02	4.0820000E-02	1.7966557E+00	4.1533395E-02	4.2286789E-02	4.3020184E-02
30.00	2.1000000E-02	1.6800000E-02	3.7800000E-02	1.7155846E+00	3.8448491E-02	3.9096982E-02	3.9745473E-02
40.00	2.0020000E-02	1.5800000E-02	3.5820001E-02	1.6674526E+00	3.6417282E-02	3.7014564E-02	3.7611845E-02
50.00	1.9260000E-02	1.5000000E-02	3.4260000E-02	1.6338171E+00	3.4820431E-02	3.5380862E-02	3.5941293E-02
60.00	1.8650000E-02	1.4400000E-02	3.3050000E-02	1.6137558E+00	3.3583346E-02	3.4116692E-02	3.4650039E-02

Table 3.1.2-(2)

TIME	GAMMA	BETA	EXPM	SGM	+SGM	+2SGM	+3SGM
70.00	1.8130000E-02	1.3900000E-02	3.2030000E-02	1.5977825E+00	3.2341770E-02	3.3053540E-02	3.3565310E-02
80.00	1.7700000E-02	1.3500000E-02	3.1200000E-02	1.5859298E+00	3.1694810E-02	3.2189621E-02	3.2684430E-02
90.00	1.7310000E-02	1.3200000E-02	3.0510000E-02	1.5769960E+00	3.0991141E-02	3.1472282E-02	3.1933424E-02
100.00	1.6960000E-02	1.2900000E-02	2.9860000E-02	1.5702027E+00	3.0328863E-02	3.0797725E-02	3.1266588E-02
200.00	1.4830000E-02	1.1100000E-02	2.5930000E-02	1.5526268E+00	2.6332596E-02	2.6735192E-02	2.7137788E-02
300.00	1.3640000E-02	1.0100000E-02	2.3740000E-02	1.5624261E+00	2.4110920E-02	2.4481840E-02	2.4852760E-02
400.00	1.2830000E-02	9.4399999E-03	2.2270000E-02	1.5771811E+00	2.2621238E-02	2.2972477E-02	2.3323715E-02
500.00	1.2220000E-02	8.9600000E-03	2.1180000E-02	1.5925443E+00	2.1517301E-02	2.1854602E-02	2.2191903E-02
600.00	1.1740000E-02	8.5799999E-03	2.0320000E-02	1.6073498E+00	2.0646614E-02	2.0973227E-02	2.1299840E-02
700.00	1.1330000E-02	8.2600000E-03	1.9590000E-02	1.6212780E+00	1.9907609E-02	2.0225217E-02	2.0542825E-02
800.00	1.0990000E-02	7.9900001E-03	1.8980000E-02	1.6342793E+00	1.9290186E-02	1.9600373E-02	1.9910559E-02
900.00	1.0700000E-02	7.7599999E-03	1.8460000E-02	1.6463957E+00	1.8763924E-02	1.9067849E-02	1.9371774E-02
1000.00	1.0440000E-02	7.5600001E-03	1.8000000E-02	1.6576983E+00	1.8298386E-02	1.8598772E-02	1.8895157E-02
2000.00	8.8310000E-03	6.3200000E-03	1.5151000E-02	1.7399294E+00	1.5414617E-02	1.5678233E-02	1.5941850E-02
3000.00	7.9780000E-03	5.6799999E-03	1.3658000E-02	1.7913051E+00	1.3902656E-02	1.4147313E-02	1.4391969E-02
4000.00	7.4140000E-03	5.2500000E-03	1.2664000E-02	1.8278089E+00	1.2895474E-02	1.3126947E-02	1.3358421E-02
5000.00	7.0000000E-03	4.9400000E-03	1.1940000E-02	1.8557193E+00	1.2161573E-02	1.2383146E-02	1.2604719E-02
6000.00	6.6760000E-03	4.7100000E-03	1.1386000E-02	1.8780938E+00	1.1599840E-02	1.1813680E-02	1.2027519E-02
7000.00	6.4160000E-03	4.5100000E-03	1.0926000E-02	1.8966379E+00	1.1133227E-02	1.1340453E-02	1.1547680E-02
8000.00	6.1940000E-03	4.3499999E-03	1.0544000E-02	1.9123939E+00	1.0745643E-02	1.0947286E-02	1.1148928E-02
9000.00	6.0060000E-03	4.2200000E-03	1.0226000E-02	1.9260422E+00	1.0422957E-02	1.0619914E-02	1.0816871E-02
10000.00	5.8420000E-03	4.1000000E-03	9.9420000E-03	1.9380497E+00	1.0134681E-02	1.0327362E-02	1.0520043E-02
20000.00	4.8699999E-03	3.4100000E-03	8.2800000E-03	2.0128608E+00	8.4486648E-03	8.6133296E-03	8.7799947E-03
30000.00	4.3780000E-03	3.0700000E-03	7.4480000E-03	2.0549878E+00	7.6010559E-03	7.7541110E-03	7.9071664E-03

Table 3.1.2-(3)

TIME	GAMMA	BETA	EXPM	SGM	+SGM	+2SGM	+3SGM
40000.00	4.0590000E-03	2.6500000E-03	6.9090001E-03	2.0657942E+00	7.0531076E-03	7.1972151E-03	7.3413227E-03
50000.00	3.8220000E-03	2.7000000E-03	6.5220001E-03	2.1111888E+00	6.6596916E-03	6.7973830E-03	6.9350745E-03
60000.00	3.6470000E-03	2.5800000E-03	6.2270000E-03	2.1335081E+00	6.3398535E-03	6.4927072E-03	6.6255607E-03
70000.00	3.5010000E-03	2.4600000E-03	5.9810000E-03	2.1538935E+00	6.1109824E-03	6.2586490E-03	6.3674735E-03
80000.00	3.3780000E-03	2.3900000E-03	5.7680000E-03	2.1729626E+00	5.8933365E-03	6.0186730E-03	6.1440095E-03
90000.00	3.2720000E-03	2.3200000E-03	5.5920001E-03	2.1910749E+00	5.7145250E-03	5.8370499E-03	5.9595748E-03
100000.00	3.1790000E-03	2.2500000E-03	5.4390000E-03	2.2084636E+00	5.5591183E-03	5.6792366E-03	5.7993550E-03
200000.00	2.6120000E-03	1.9100000E-03	4.5220000E-03	2.3620628E+00	4.6286124E-03	4.7356249E-03	4.8424375E-03
300000.00	2.3040000E-03	1.7300000E-03	4.0340000E-03	2.4977317E+00	4.1347585E-03	4.2335170E-03	4.3362755E-03
400000.00	2.0920000E-03	1.6300000E-03	3.7220000E-03	2.6233372E+00	3.8196406E-03	3.9172812E-03	4.0149218E-03
500000.00	1.9310000E-03	1.5700000E-03	3.5010000E-03	2.7415309E+00	3.5969810E-03	3.6929620E-03	3.7889430E-03
600000.00	1.8000000E-03	1.5000000E-03	3.3000000E-03	2.8537639E+00	3.3941743E-03	3.4883484E-03	3.5825227E-03
700000.00	1.6910000E-03	1.4700000E-03	3.1610000E-03	2.9609944E+00	3.2545971E-03	3.3481942E-03	3.4417912E-03
800000.00	1.5960000E-03	1.4200000E-03	3.0160000E-03	3.0639209E+00	3.1084078E-03	3.2008157E-03	3.2932236E-03
900000.00	1.5130000E-03	1.3900000E-03	2.9030000E-03	3.1630723E+00	2.9948240E-03	3.0866480E-03	3.1784719E-03
1000000.00	1.4400000E-03	1.3500000E-03	2.7900000E-03	3.2588711E+00	2.8809225E-03	2.9718450E-03	3.0627675E-03
1999999.99	1.0866000E-03	1.2050000E-03	2.2916000E-03	4.0869849E+00	2.3852573E-03	2.4789147E-03	2.5725720E-03
2999999.99	7.3320000E-04	1.0600000E-03	1.7932000E-03	4.7668198E+00	1.8786786E-03	1.9641572E-03	2.0496359E-03

Table 3.1.3 E_j and λ_j for Each Group of Exponential to Represent GE+3 σ

j	E_j	λ_j
1	1.4293374×10^{-2}	4.0373598×10^{-1}
2	1.4585988×10^{-2}	9.3893368×10^{-2}
3	1.1817469×10^{-2}	2.2064827×10^{-2}
4	9.6641711×10^{-3}	4.5052452×10^{-3}
5	7.9248464×10^{-3}	8.9024215×10^{-4}
6	6.1252875×10^{-3}	1.7214156×10^{-4}
7	3.8903882×10^{-3}	2.9417218×10^{-5}
8	2.9009148×10^{-3}	4.1246905×10^{-6}
9	3.7342456×10^{-3}	1.9632666×10^{-7}

Table 3.1.6 List of Statements of Modified Subroutines

MODEL	KMUL	Fission	F.P.	Acti.
1	0	Yes	No	No
	$\neq 0$	Yes	No	No
2	0	Yes	ANS \times 1.0	No
	$\neq 0$	Yes	ANS \times 1.2	No
3	0	Yes	ANS \times 1.0	Yes
	$\neq 0$	Yes	ANS \times 1.2	Yes
4	0	Yes	GE + 3 σ	No
	$\neq 0$	Error stop		
5	0	Yes	GE + 3 σ	Yes
	$\neq 0$	Error stop		

MODEL = -1, 0 ; See ref. 1),15),25)

Table 3.1.4-(1) Fitting of GE+30 FP Decay Heat by Summation of Exponentials

GE + 35GMA CURVE FITTING

I	WEIGHT	INDEPENDENT VARIABLE (Time)	DEPENDENT VARIABLE (GE + 30 th)	CALCULATED FUNCTION ($\sum_{i=1}^n A_i e^{-\lambda_i t}$)	DEVIATION	ERROR(%)	STD. DEV. OF PREDICTED MEAN
1	1.000000E+00	2.000000E-01	7.3235299E-02	7.3494166E-02	-2.5886670E-04	0.353	3.2823022E-05
2	1.000000E+00	3.000000E-01	7.2763400E-02	7.2807578E-02	-4.4178218E-05	0.060	2.7491556E-05
3	1.000000E+00	4.000000E-01	7.2267801E-02	7.2142946E-02	1.2485497E-04	-0.172	2.3432018E-05
4	1.000000E+00	5.000000E-01	7.1606901E-02	7.1499435E-02	1.0746531E-04	-0.150	2.0729918E-05
5	1.000000E+00	5.999999E-01	7.0946500E-02	7.0876254E-02	7.0245937E-05	-0.099	1.9378073E-05
6	1.000000E+00	7.000000E-01	7.0377501E-02	7.0272636E-02	1.0486506E-04	-0.149	1.9195071E-05
7	1.000000E+00	8.000000E-01	6.9713701E-02	6.9687845E-02	2.5855377E-05	-0.037	1.9855354E-05
8	1.000000E+00	9.000000E-01	6.9163799E-02	6.9121175E-02	4.2624772E-05	-0.062	2.1013643E-05
9	1.000000E+00	1.000000E+00	6.8514800E-02	6.8571948E-02	-5.7147816E-05	0.083	2.2398347E-05
10	1.000000E+00	2.000000E+00	6.3800899E-02	6.3907372E-02	-1.0647252E-04	0.167	3.0944432E-05
11	1.000000E+00	3.000000E+00	6.0344800E-02	6.0408426E-02	-6.3625164E-05	0.105	2.9194014E-05
12	1.000000E+00	4.000000E+00	5.7725300E-02	5.7715556E-02	9.7444281E-06	-0.017	2.6339898E-05
13	1.000000E+00	5.000000E+00	5.5610700E-02	5.5586285E-02	2.4414621E-05	-0.044	2.5449212E-05
14	1.000000E+00	6.000000E+00	5.3850100E-02	5.3856540E-02	-6.4391643E-06	0.012	2.5446643E-05
15	1.000000E+00	7.000000E+00	5.2393200E-02	5.2414789E-02	-2.1588989E-05	0.041	2.5479879E-05
16	1.000000E+00	8.000000E+00	5.1235300E-02	5.1184766E-02	5.0533563E-05	-0.099	2.5900966E-05
17	1.000000E+00	9.000000E+00	5.0129000E-02	5.0113910E-02	1.5090220E-05	-0.030	2.7392338E-05
18	1.000000E+00	1.000000E+01	4.9178200E-02	4.9165636E-02	1.2563542E-05	-0.026	3.0137220E-05
19	1.000000E+00	2.000000E+01	4.3020200E-02	4.3079595E-02	-5.9395097E-05	0.138	4.6528201E-05
20	1.000000E+00	3.000000E+01	3.9745500E-02	3.9742163E-02	3.3369298E-06	-0.008	3.5937294E-05
21	1.000000E+00	4.000000E+01	3.7611800E-02	3.7551892E-02	5.9908256E-05	-0.159	3.5699401E-05
22	1.000000E+00	5.000000E+01	3.5941300E-02	3.5941130E-02	1.7043203E-07	0.000	3.1706287E-05
23	1.000000E+00	6.000000E+01	3.4650000E-02	3.4664797E-02	-1.4796853E-05	0.042	2.7446885E-05

Table 3.1.4-(2)

24	1.0000000E+00	7.0000000E+01	3.3565300E-02	3.3607227E-02	-4.1927211E-05	0.125	2.6959790E-05
25	1.0000000E+00	8.0000000E+01	3.2684400E-02	3.2707201E-02	-2.2801571E-05	0.070	2.8683075E-05
26	1.0000000E+00	9.0000000E+01	3.1953400E-02	3.1927897E-02	2.5503337E-05	-0.080	3.0811877E-05
27	1.0000000E+00	1.0000000E+02	3.1266600E-02	3.1244522E-02	2.2077933E-05	-0.071	3.3205994E-05
28	1.0000000E+00	2.0000000E+02	2.7137800E-02	2.7114757E-02	1.9042753E-05	-0.070	5.0670690E-05
29	1.0000000E+00	3.0000000E+02	2.4852800E-02	2.4809120E-02	-3.6320183E-05	0.146	3.5097664E-05
30	1.0000000E+00	4.0000000E+02	2.3323700E-02	2.3339142E-02	-1.5441794E-05	0.066	3.6049545E-05
31	1.0000000E+00	5.0000000E+02	2.2191900E-02	2.2176471E-02	1.5428755E-05	-0.070	3.2219195E-05
32	1.0000000E+00	6.0000000E+02	2.1299800E-02	2.1266861E-02	3.2939017E-05	-0.155	2.7294138E-05
33	1.0000000E+00	7.0000000E+02	2.0342800E-02	2.0529564E-02	1.3236422E-05	-0.064	2.6432214E-05
34	1.0000000E+00	8.0000000E+02	1.9910600E-02	1.9912802E-02	-2.2016466E-06	0.011	2.8531037E-05
35	1.0000000E+00	9.0000000E+02	1.9371800E-02	1.9382770E-02	-1.0769583E-05	0.057	3.1018371E-05
36	1.0000000E+00	1.0000000E+03	1.889200E-02	1.8917125E-02	-2.1925196E-05	0.116	3.3207550E-05
37	1.0000000E+00	2.0000000E+03	1.5941900E-02	1.5956093E-02	-1.4192890E-05	0.089	4.9056944E-05
38	1.0000000E+00	3.0000000E+03	1.4392000E-02	1.4362136E-02	2.9864255E-05	-0.208	3.5893700E-05
39	1.0000000E+00	4.0000000E+03	1.3358400E-02	1.3345139E-02	1.3260869E-05	-0.099	3.4433815E-05
40	1.0000000E+00	5.0000000E+03	1.2604700E-02	1.2613136E-02	-8.4363855E-06	0.067	3.2977662E-05
41	1.0000000E+00	6.0000000E+03	1.2027500E-02	1.2039260E-02	-1.1760509E-05	0.098	2.8066077E-05
42	1.0000000E+00	7.0000000E+03	1.1547700E-02	1.1565148E-02	-1.7447630E-05	0.151	2.5653143E-05
43	1.0000000E+00	8.0000000E+03	1.1148900E-02	1.1161341E-02	-1.2641074E-05	0.113	2.7712379E-05
44	1.0000000E+00	9.0000000E+03	1.0816900E-02	1.0811963E-02	4.9353112E-05	-0.046	3.1460596E-05
45	1.0000000E+00	1.0000000E+04	1.0520000E-02	1.0505891E-02	1.4109304E-05	-0.134	3.4684449E-05
46	1.0000000E+00	2.0000000E+04	8.7799900E-03	8.7467938E-03	3.3194199E-05	-0.378	4.3337631E-05
47	1.0000000E+00	3.0000000E+04	7.9071701E-03	7.9202217E-03	-1.3051555E-05	0.165	3.7486351E-05
48	1.0000000E+00	4.0000000E+04	7.3413200E-03	7.3703936E-03	-2.9073562E-05	0.396	3.0363815E-05

Table 3.1.4-(3)

49	1.000000E+00	5.000000E+04	6.935700E-03	6.952924E-03	-1.785450E-05	0.257	2.9921634E-05
50	1.000000E+00	6.000000E+04	6.625560E-03	6.621609E-03	3.951019E-06	-0.060	2.8727140E-05
51	1.000000E+00	7.000000E+04	6.367470E-03	6.352963E-03	1.450616E-05	-0.228	2.6430913E-05
52	1.000000E+00	8.000000E+04	6.144010E-03	6.131419E-03	1.259020E-05	-0.205	2.5876639E-05
53	1.000000E+00	9.000000E+04	5.959569E-03	5.945693E-03	1.387659E-05	-0.232	2.8347301E-05
54	1.000000E+00	1.000000E+05	5.799350E-03	5.787407E-03	1.194269E-05	-0.206	3.2653162E-05
55	1.000000E+00	2.000000E+05	4.842440E-03	4.872657E-03	-3.021711E-05	0.624	4.0707166E-05
56	1.000000E+00	3.000000E+05	4.336280E-03	4.362887E-03	-2.660788E-05	0.614	3.3345117E-05
57	1.000000E+00	4.000000E+05	4.014920E-03	4.009431E-03	5.488516E-06	-0.137	3.2811217E-05
58	1.000000E+00	5.000000E+05	3.788940E-03	3.753965E-03	3.497471E-05	-0.923	2.8656927E-05
59	1.000000E+00	6.000000E+05	3.582520E-03	3.563481E-03	1.903856E-05	-0.531	2.4557680E-05
60	1.000000E+00	7.000000E+05	3.441790E-03	3.416415E-03	2.537405E-05	-0.737	2.3990945E-05
61	1.000000E+00	8.000000E+05	3.293220E-03	3.298500E-03	-5.280540E-06	0.160	2.6442723E-05
62	1.000000E+00	9.000000E+05	3.178470E-03	3.200282E-03	-2.181256E-05	0.686	2.9634138E-05
63	1.000000E+00	1.000000E+06	3.062700E-03	3.115496E-03	-3.272647E-05	1.017	3.2222477E-05
64	1.000000E+00	2.000000E+06	2.572370E-03	2.522355E-03	5.021446E-05	-1.95	3.4095227E-05
65	1.000000E+00	3.000000E+06	2.049640E-03	2.072119E-03	-2.247898E-05	1.096	5.2302330E-05

Table 3.1.5 Options to Calculate Decay Heat of FP and Actinides

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE INRKEN (NCOR,NSC,MAXCOR,MAXNSC,MAXTRP,MAXTBL,IN2,	00000010
	1	ISPROG, LENGTH, DATA, FA, IA)	00000020
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)	00000030
3		REAL*8 DATA(1),FA(1)	00000040
4		INTEGER IA(2,1)	00000050
5		DIMENSION LENGTH(1)	00000060
	C		00000070
	C	NCOR = NUMBER OF CORE REGIONS	00000080
	C	NSC = NUMBER OF SCRAM CURVES	00000090
	C	MAXCOR = MAXIMUM NUMBER OF CORE REGIONS	00000100
	C	MAXNSC = MAXIMUM NUMBER OF SCRAM CURVES	00000110
	C	MAXTRP = MAXIMUM TRIP TYPE	00000120
	C	MAXTBL = MAXIMUM NUMBER OF ENTRIES TO TABLES	00000130
	C	IN2 = FLAG TO SET UP OLD PLOT TAPE	00000140
	C	LENGTH = COMMON BLOCK LENGTHS	00000150
	C		00000160
6		COMMON / CORPOW / DPOW, F0(50), LAMBDA, M0(50), PPOW, PROMPT,	00000170
	1	0DMOD(50), 0FRAC(50), 0N(21), 0PHOD(50), SE(50), TAU, TM(50),	00000180
	2	TS(50), VW(50), ISLB(50), IVOL(50)	00000190
7		REAL*8 LAMBDA, M0	00000200
	C		00000210
	C	PROMPT = FRACTION OF TOTAL POWER APPEARING AS PROMPT, DEFAULT=1.0	00000220
	C		00000230
8		COMMON / IREKIN / ALPHA(20), CONKIN(3), EGAM(14), F1(6),	00000240
	10	MAX, 0MIN	00000250
	C		00000260
9		COMMON / RKENER / BOVL, DT, RHOIN, W1, UDUF, NODEL, KMUL	00000270
	C		00000280
	C	BOVL = BETA / MEAN NEUTRON LIFETIME	00000290
	C	DT = IREKIN TIME INTERVAL	00000300
	C	RHOIN = INITIAL REACTIVITY	00000310
	C	W1 = PERIOD AT PREVIOUS TIME STEP	00000320
	C	NODEL = NUMBER OF DELAYED GROUPS	00000330
	C	LE 0 = POWER VS TIME	00000340
	C	GE 1 = REACTIVITY VS TIME	00000350
	C	KMUL = MULTIPLYING FACTOR FOR DECAY ENERGY RELEASE RATES	00000360
	C	EO 0 = 1.0 ANS RATES	00000370
	C	NE 0 = 1.2 ANS RATES	00000380
	C	UDUF = U-238 ATOMS CONSUMED PER U-235 ATOMS FISSIONED	00000390
	C	THE DEFAULT VALUE IS 1.0	00000400
10		DIMENSION ALPHG(11), EGAMG(11)	00000401
11		DATA ALPHG/	00000402
	*	-4.0373598D-1, -9.3893368D-2, -2.2064827D-2, -4.5052452D-3,	00000403
	*	-8.9024215D-4, -1.7214156D-4, -2.9417218D-5, -4.1246905D-6,	00000404
	*	-1.9832686D-7, -2.9590000D-8, -0.7585000D-9/	00000405
12		DATA EGAMG/	00000406
	*	1.4293374D-2, 1.4585988D-2, 1.1817449D-2, 9.6641711D-3,	00000407
	*	7.9244464D-3, 6.1252875D-3, 3.8903882D-3, 2.9009148D-3,	00000408
	*	3.7342456D-3, 0.0000000D+0, 0.0000000D+0/	00000409
	C		00000410
13		DIMENSION L3(11)	00000420
14		DATA L3 /140000,0,4,8,0,1,0,0,2,1,1/	00000430
	C		00000440
15		IF (NCOR,LE,0) GO TO 200	00000450
	C		00000460
	C	WRITE PAGE HEADING	00000470
	C		00000480
	C	READ KINETICS DATA	00000490
16		PROMPT = 1.0	00000500
17		L3(6) = 1	00000510
18		CALL INP2(DATA,FA,L3,IA)	00000520
19		IF (L3(6),GT, 0) GO TO 101	00000530
20		CALL FAIL	00000540
21		GO TO 200	00000550
22	101	NODEL = IA(2,1)	00000560
23		KMUL=IA(2,2)	00000570
24		BOVL=FA(3)	00000580
25		RHOIN=FA(4)	00000590
26		UDUF=FA(5)	00000600
27		IF (NODEL,GT,1) PROMPT = EGAM(14)	00000610
28		IF (L3(6),GE,6, AND , FA(6),GT,0,0) PROMPT = FA(6)	00000620
29		WRITE (6,611) NODEL, BOVL,RHOIN,UDUF	00000630
30		IF (L3(6),LE,6) GO TO 50	00000640
31		LAMBDA = FA(7)	00000650

```

32      TAU      = FA(8)                                00000660
33      WRITE (6, 650) LAMBDA, TAU                     00000670
34      LAMBDA = LAMBDA/3600.0                          00000680
35      50 CONTINUE                                     00000690
36      650 FORMAT (1H0,'FRACTION OF SURFACE HEAT FLUX UTILIZED IN PRODUCING S00000700
      *UBCOOLED VAPOR BUBBLES ** , 1PE12.5/1H0,'VAPOR BUBBLE LIFETIME 00000710
      * (SEC)                                     ** ,1PE12.5) 00000720
      C      IF (NODEL.LT.(-1).OR.NODEL.GT.3) GO TO 120 00000730
37      IF (NODEL.LT.(-1).OR.NODEL.GT.5) GO TO 120 00000732
38      IF ((NODEL.EQ.4.OR.NODEL.EQ.5).AND.KMUL.NE.0) GO TO 125 00000734
39      IF ((NODEL.EQ.4.OR.NODEL.EQ.5) GO TO 60 00000736
40      IF (ABS(ISPRG).NE.1) GO TO 60 00000740
41      IF ((NODEL.EQ.3 .AND. KMUL .NE. 0).OR. NODEL.EQ.-1) GO TO 60 00000750
42      WRITE(6,601) 00000760
43      601 FORMAT(54H0***** ERROR -- EM ACCEPTANCE CRITERIA FOR KINETICS, 00000770
      1      48H HAVE NOT BEEN MET, NODEL MUST EQUAL 3 AND KMUL, 00000780
      2      18H MUST NOT EQUAL 0, ) 00000790
44      WRITE(6,602) 00000800
45      602 FORMAT(100X,27H***** EXECUTION DELETED.) 00000810
46      ISPRG = -1 00000820
47      CALL FAIL 00000830
48      GO TO 60 00000832
49      125 WRITE(6,635) 00000834
50      CALL FAIL 00000836
51      60 CONTINUE 00000840
52      NODEL = NODEL + 2 00000850
      C      GO TO (130,160,170,180,30), NODEL 00000860
53      GO TO (130,160,170,180,30,190,190), NODEL 00000862
      C
      C      BAD POWER TYPE
54      120 WRITE (6,612) 00000880
55      CALL FAIL 00000890
56      IF (NODEL) 130,160,160 00000900
      C
      C      POWER VERSUS TIME FROM TAPE
57      130 NODEL = -1 00000910
58      WRITE (6,613) 00000920
59      IF (IN2) 140,140,150 00000930
60      140 CALL INRCD1(0,0,LENGTH) 00000940
61      GO TO 200 00000950
62      150 WRITE (6,615) 00000960
63      GO TO 200 00000970
      C
      C      POWER VERSUS TIME FROM CARDS
64      160 NODEL = 0 00000980
65      WRITE (6,616) 00000990
66      GO TO 200 00001000
      C
      C      NORMAL REACTOR KINETICS EQUATIONS
67      170 NODEL = 7 00001010
68      WRITE (6,617) 00001020
69      GO TO 200 00001030
70      190 WRITE(6,634) 00001040
71      SUM = 0.000 00001050
72      DO 210 I=1,11 00001060
73      EGAM(I) = EGAMG(I) 00001070
74      ALPHA(I+7) = ALPHG(I) 00001080
75      210 SUM = SUM + EGAM(I) 00001090
76      PROMPT = 1.000 - SUM 00001100
77      IGE = NODEL - 5 00001110
78      GO TO (180,30), IGE 00001120
79      180 NODEL = 18 00001130
80      WRITE (6, 618) PROMPT 00001140
81      GO TO 200 00001150
      C
82      30 NODEL=20 00001160
83      WRITE (6,621) 00001170
84      IF (UDUF.GT.0.CO1D0) GO TO 40 00001180
85      UDUF=1.000 00001190
86      WRITE (6,622) 00001200
87      40 IF (KMUL.NE.0) WRITE (6,632) 00001210
88      WRITE (6, 633) PROMPT 00001220
      C      READ SCRAM DATA OR POWER VERSUS TIME 00001230
89      200 CALL INSCRM (NCOR,NSC,NODEL,MAXNSC,MAXTRP,MAXTBL,DATA,FA,IA) 00001240
      C

```

```

C   READ REACTIVITY DATA                                00001250
90  CALL INREAC (NCOR,NODEL,MAXCOR,MAXTBL,DATA,FA,IA)    00001260
91  RETURN                                                00001270
C   C                                                     00001280
C   C                                                     00001290
92  611 FORMAT (29H1REACTOR KINETICS PARAMETERS, /      00001300
      110H0 POWER.12X.51HBETA OVER INITIAL U-238 ATOMS C00001310
      2NSUMED /                                         00001320
      36X. 4HTYPE .12X.55HLIFETIME REACTIVITY PER U-235 ATOM00001330
      4 FISSIONED /                                     00001340
      51H0.19.10X.2E15.6.5X.E15.6)                   00001350
93  612 FORMAT (70X.40HERNOR IN POWER TYPE, EXECUTION DELETED, ) 00001360
94  613 FORMAT (37HONORMALIZED POWER RETRIEVED FROM TAPE ) 00001370
95  615 FORMAT (49HOTAPE WAS POSITIONED BY A PREVIOUS INPUT ROUTINE.) 00001380
96  616 FORMAT (37HOTABLE OF NORMALIZED POWER FROM CARDS ) 00001390
97  617 FORMAT (38H01 PROMPT AND 6 DELAYED NEUTRON GROUPS ) 00001400
98  618 FORMAT (38H01 PROMPT AND 6 DELAYED NEUTRON GROUPS * 00001410
      * 31H PLUS 11 DELAYED GAMMA EMITTERS /26H PROMPT ENERGY FRAC00001420
C   *TION = .F6.3)                                     00001430
C   *TION = .F8.5)                                     00001435
99  621 FORMAT (38H01 PROMPT AND 6 DELAYED NEUTRON GROUPS * 00001440
      1 32H PLUS 11 DELAYED GAMMA EMITTERS./ 00001450
      2 22H PLUS U-239 AND NP-239 ) 00001460
100 622 FORMAT(1H0.01X.97H*** CAUTION - THE RATIO OF U-238 CONSUMED TO U-200001470
      135 FISSIONED, UDUF, HAS BEEN DEFAULTED TO 1.0 ***/) 00001480
101 632 FORMAT (65H THE ANS DECAY ENERGY RELEASE RATES HAVE BEEN MULTIPL00001490
      1IED BY 1.2/) 00001500
C633 FORMAT (1H0.25HPROMPT ENERGY FRACTION = .F6.3) 00001510
102 633 FORMAT (1H0.25HPROMPT ENERGY FRACTION = .F8.5) 00001511
103 634 FORMAT('O FISSION PRODUCTS DECAY HEAT IS CALCULATED BY GE + 3 SIGM00001512
      *A. ') 00001513
104 635 FORMAT('O NODEL AND KMUL ARE INCONSISTENT. *** EXECUTION DELETED00001514
      *. ') 00001515
105 END 00001520

```

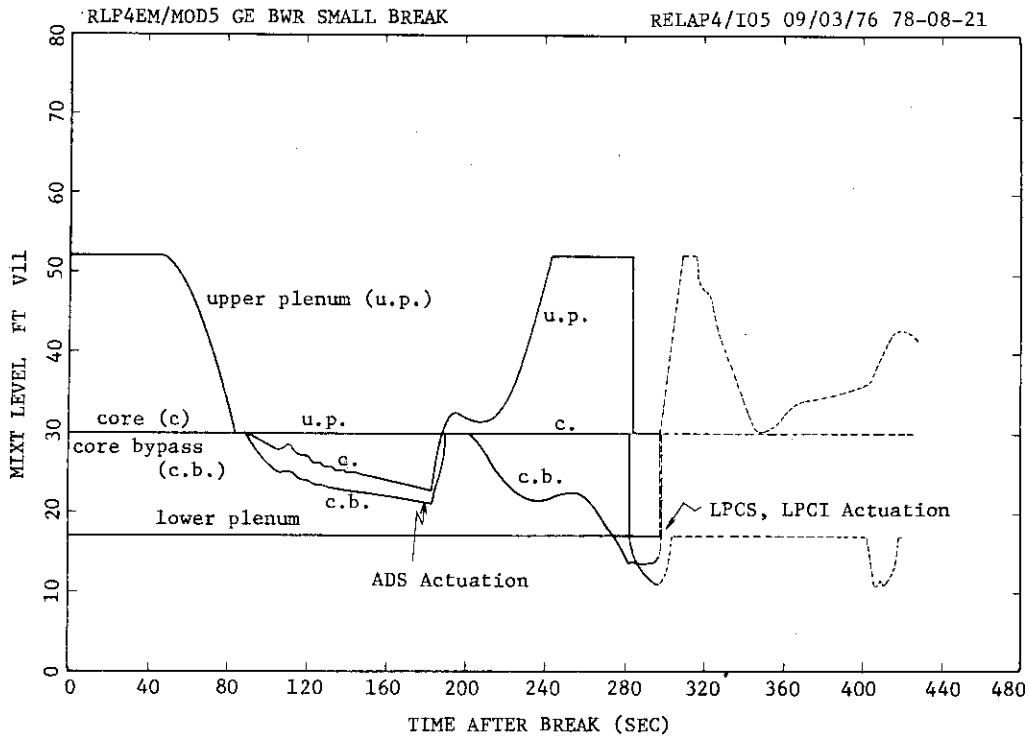



Fig. 3.1.4 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by Original RELAP4/MOD5

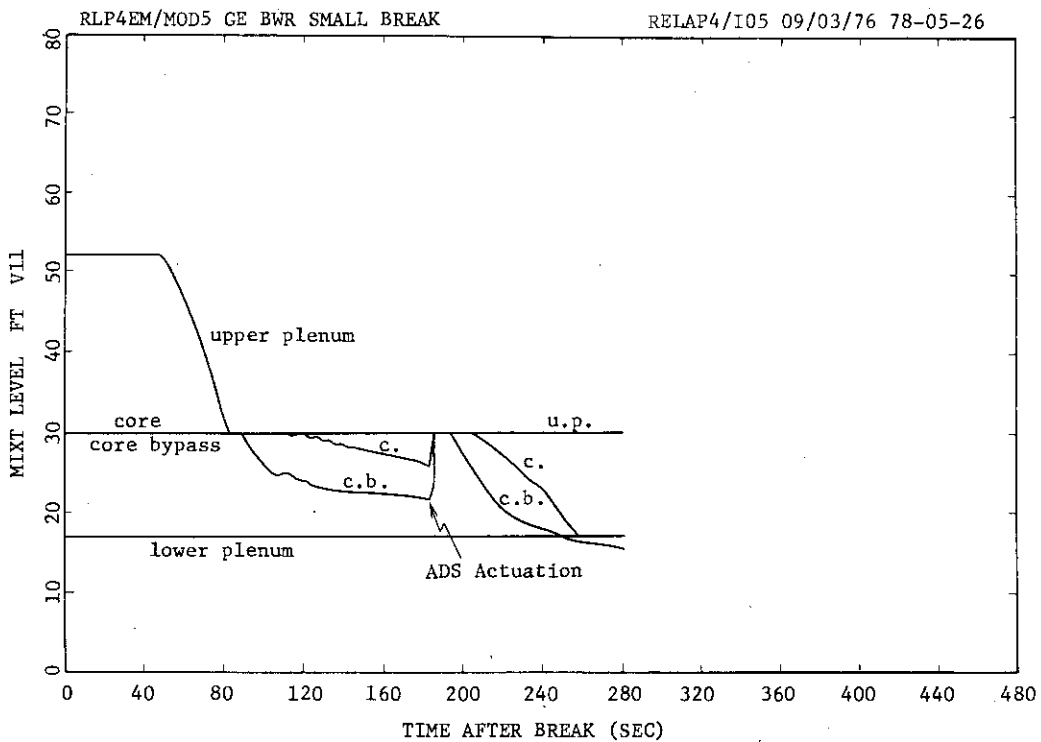


Fig. 3.1.5 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Stacking Option and Wilson's Bubble Velocity Correlation

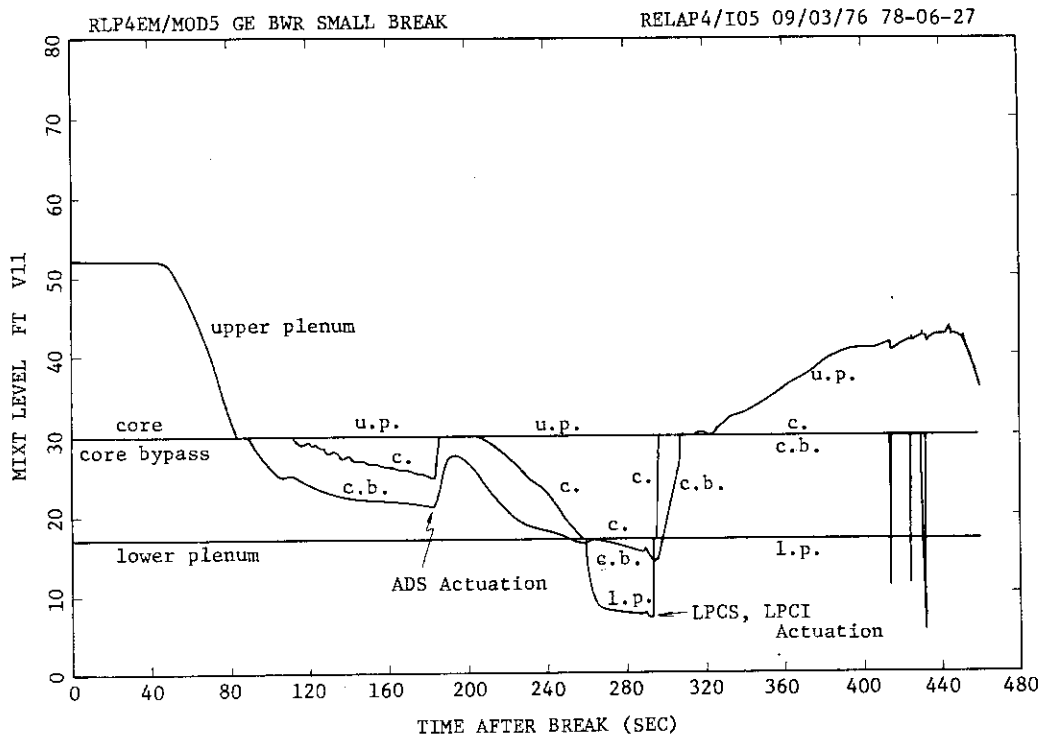


Fig. 3.1.6 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Enthalpy Smoothing in Addition to the Case of Fig.3.1.5

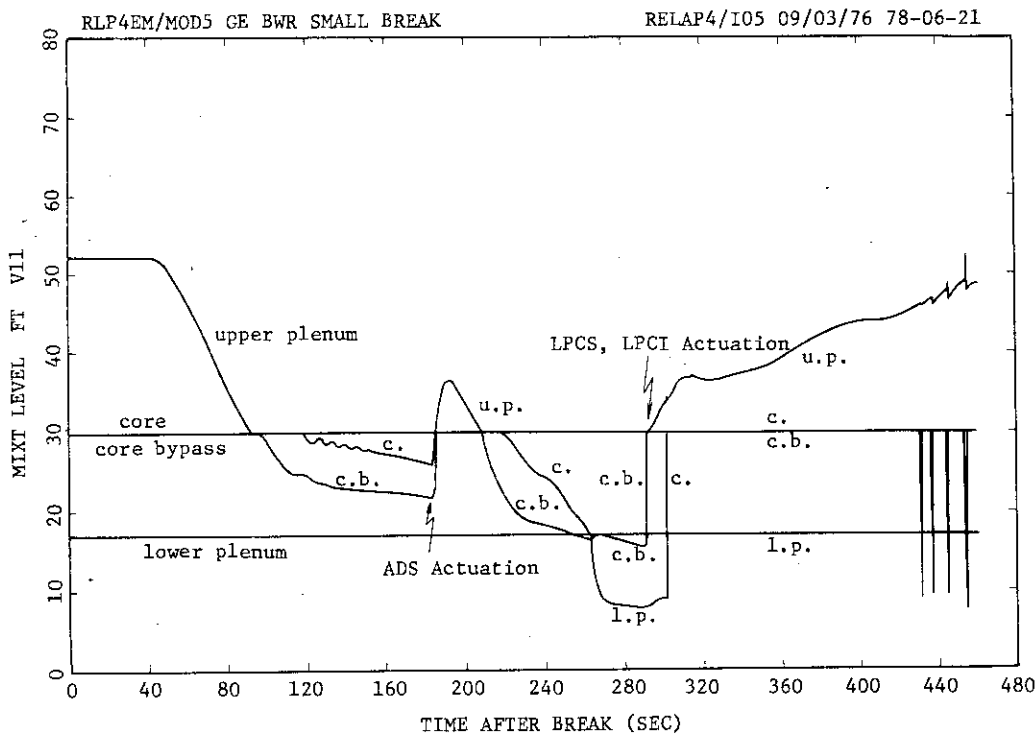


Fig. 3.1.7 Mixture Level in In-Shroud Region during BWR Small Break LOCA, Which is Calculated by RELAP4/MOD5 with Modified Vertical Slip Velocity in Addition to the Case of Fig. 3.1.6

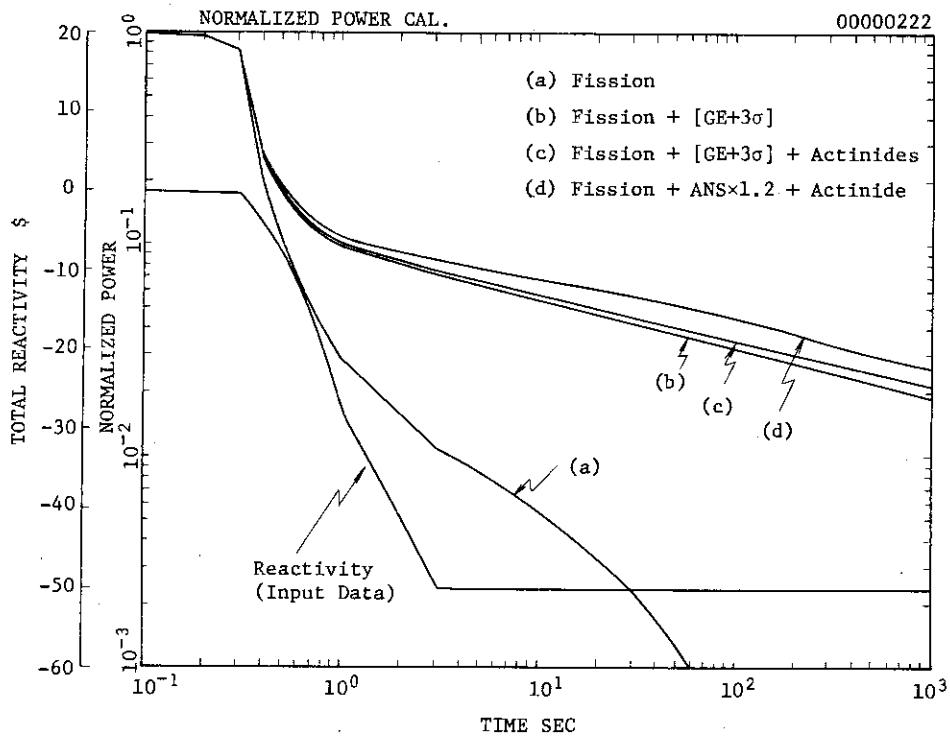


Fig. 3.1.8 Power Curve Calculation by RELAP4 Power Calculation in the Case of PWR large Break LOCA

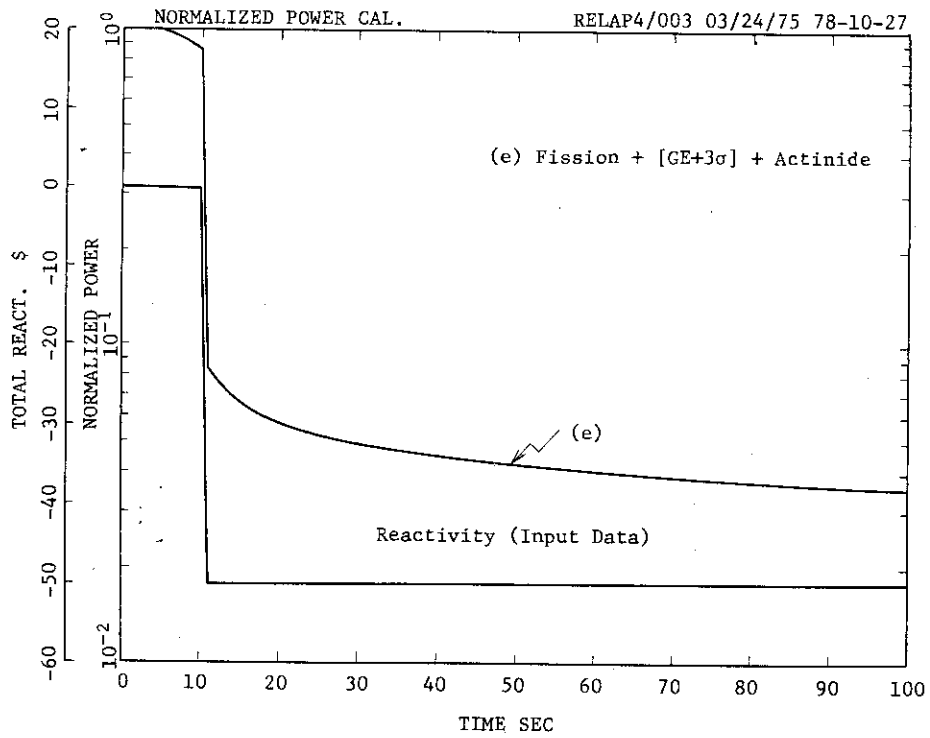


Fig. 3.1.9 Power Curve Calculated by RELAP4 Power Calculation in the Case of PWR Small Break LOCA

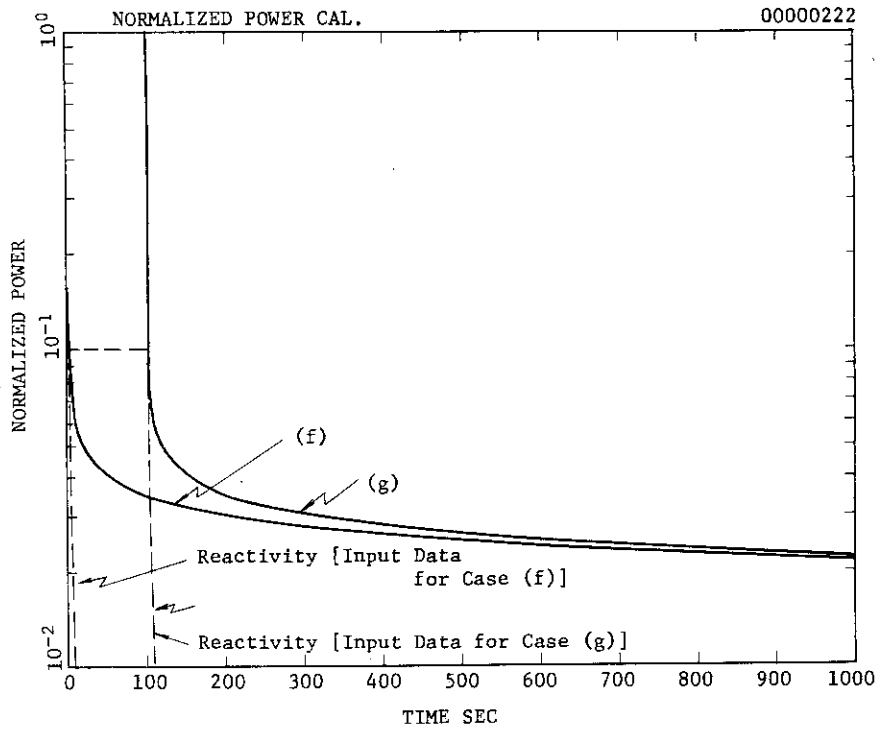


Fig. 3.1.10 Power Curve Calculated by RELAP4 Power Curve Calculation for Checking

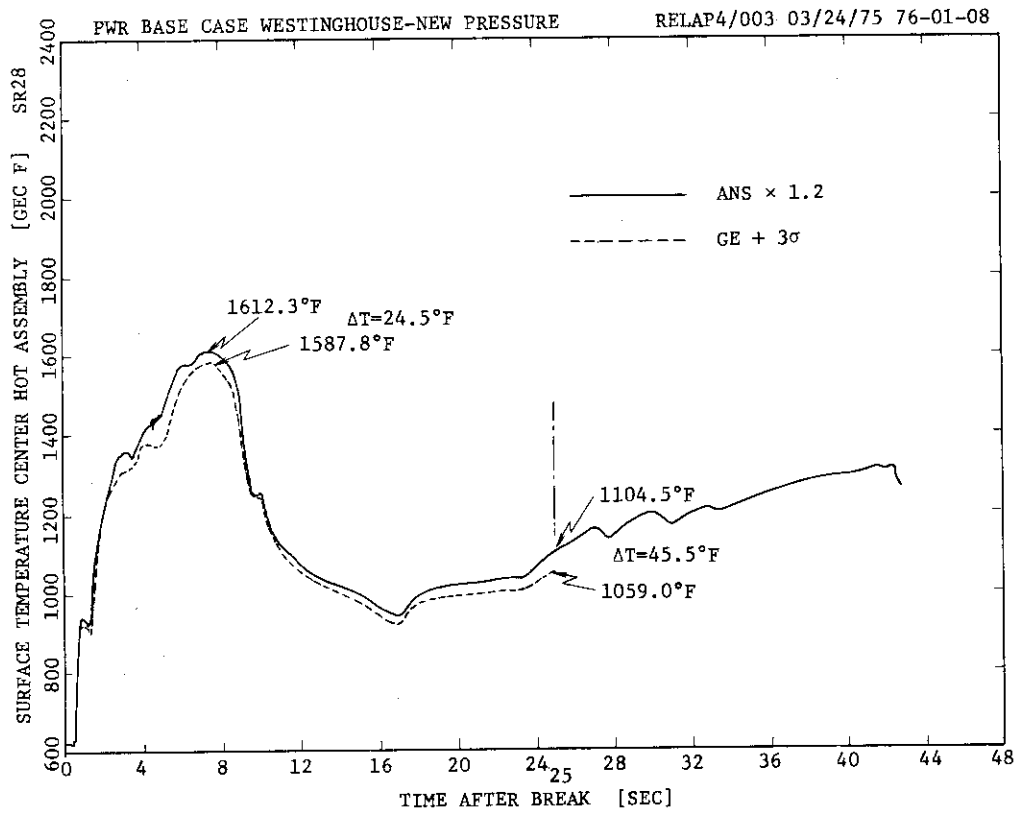


Fig. 3.1.11 Difference in Cladding Temperature with ANS 1.2 and GE+3σ

3.2 RELAP/REFLA用プロッタ・ルーチンの整備

3.2.1 はじめに

RELAP/REFLAの計算結果のプロットは、その母体となったRELAP4のプロッタールーチン(PLOT5)を使用している関係上、コードのREFLA部分で計算される炉心内のクエンチに関する情報や、燃料棒温度やボイド率等の軸方向の詳しい分布の情報は、その一部分(RELAP部分の変数に代入されている物理量)を除いては、プロッターによる作図が出来なかった。

そこでREFLA部分で計算されている物理量の中で重要なものを、RELAP4の物理量とほとんど同等の取り扱いでプロット可能なようにRELAP/REFLA及びプロッタールーチンを改造した。改造に際しては、RELAP/REFLA実行時のプロットテープへの書き形式がオリジナルのRELAP4のものと同型式になるようにしたので、プロッタージョブの実行時の入力形式もRELAP4のプロッタールーチンによるジョブと同様の形式で行うことができる。またRELAP4による出力テープ単独、及びRELAP4とRELAP/REFLAの両方のテープ(2本以上)から同時にプロットすることも可能である。

3.2.2 追加された変数

新たにプロット可能な変数として追加された物理量と対応する識別符号(プロッタージョブの際入力として用いる)は以下の通りである。

GROUP 1 (炉心軸方向分布(91メッシュ)を持つもの)

(物理量)	(単位)	(識別記号)	(インデックス)
1. 燃料表面温度	°C	TW	1 ~ 91
2. 熱伝達係数	kcal/hr °C・m ²	HT	"
3. 対流熱流束	kcal/hr・m	HC	"
4. 輻射熱流束	kcal/hr・m	HR	"
5. ボイド率	—	AG	"
6. 流体温度 ^(*)	°C	TL	"
7. 蒸气流束	cm/sec	UG	"
8. 圧力	kg/m ²	DP	"
9. DUMMY	—	D1	"
10. DUMMY	—	D2	"

GROUP 2 (クエンチ情報とバウンダリレベル)

11. クエンチ速度 (Bottom, Top)	cm/sec	VQ	1, 2
12. クエンチ温度 (" , ")	°C	TQ	1, 2
13. バウンダリレベル	m	ZB	1~7

GROUP 3 (スカラー量)

14. 入口流速 (l)	cm/sec	VI
15. 出口流速 (l)	cm/sec	VO
16. 最高線出力	kcal/m	QL

17.	キャリーオーバー (**)	—	CF
18.	飽和温度	°C	RS
19.	出口流速 (蒸気)	cm/sec	VV
20.	軸長 (炉心高さ) (***)	m	RL
21. } 24. }	DUMMY	—	D 3
			D 6

*) 流体温度：サブクール及び飽和 二相領域では水温，
過熱蒸気が存在する場合は蒸気温度を示す。

**) キャリーオーバー：出口流量中に水の占める質量割合

***) 軸長：これは時間の関数でなく入力値であるがグラフの横軸スケールを決めるためデータとしてプロットテープに記入してある。

3.2.3 プロットテープへの書き込み

上記2で述べた変数に対応するデータをサブルーチンPLTAPEへCOMMON文で送り、PELAP部分のデータに引き続いてテープへ書き込んでゆく。そのためテープに書き込まれる時間間隔はRELAPのminor editの間隔になる (REFLA部分のedit間隔とは異なるので注意)。

3.2.4 プロッタージョブの入力形式

RELAP 4のプロッタプログラムPLOT5におけるものに準じており、以下に述べるような追加のステートメントが使用できる。

1) 入力FORMAT

(コラム)	(型)	(変数)	(内容)
1 ~ 2	A 2	VAR	識別符号
3 ~ 5	I 3	INDX	インデクス
6	AI	L	軸の種類 (リニア, Log) 等の指示
7 ~ 8	I 2	LNTH	目盛数 (軸長 / 2 cm)
9 ~ 14	E 6, 2	MIN	最小値
15 ~ 20	E 6, 2	MAX	最大値
21 ~ 26	E 6, 2	SCALE	スケール (倍数)
27 ~ 72	(13A4, A2)	LABEL	Y軸に沿って記入するタイトル

2) 入力カードのセット

入力形式はRELAP 4の物理量を取り扱う場合と全く同様である。追加機能に関係した新しい入力カードは、次のようなものである。

(2-1) EV カード

Group 1 (3.2.2) のデータに関して軸方向分布をプロットしたい時に入力する“Elevation”についてのカードである。このカードにより、X軸の変数は炉心内の高さ(m)となる。次にEV又はTIカードが現われるまで有効。“INDX”欄はブランク。

例) EV 10 0.00 4.00

(..... 高さ 0 ~ 4 mを指定)

(2-2) TT カード

Group 1 のデータに関して軸方向分布をプロットする際、パラメータとしての時刻を指定する。EV カードと合わせて用いる。“MIN” 欄に時刻 (秒)、他はblank。

例) TT 1.00 E1

(..... 10 秒における分布を指定)

(2-3) OV カード

従来からある重ね書き用のカードであるが、今回新たに付け加えられた機能として、重ね書きの各曲線上に識別のためのマーク (数字又は記号) を打つことができる。

L 欄がblank マークなし。

L 欄が「N」 1~9 の数字を各曲線につける。

「S」 ○ □ × などの記号をつける。

また、マークと変数の対応が図の右肩部に表示される。(変数名は単独書きの時にも右肩部に表示される)

以上の追加コードとの組み合わせで各種のプロットが可能である。

Group 1 のデータに対しては、変数の時間変化をプロットする時 (X軸用に TI カードを用いる時) は、変数カードの“INDX” 欄にメッシュ番号を記入する。軸方向分布をプロットする時 (X軸用に EV カードを用いる時) は“INDX” 欄はblankまたは0とする。

Group 2 のデータに対しては“INDX” 欄は必ず記入する。

Group 3 のデータに対しては“INDX” 欄はblankまたは0。

例) TI 1 0 0.0 0 2 0 0.0

TW 1 5 8 0.0 0 1.0 E 3

EV 1 0 0.0 0 4.0 0

TW 8

TT 2 0.0

(説明) 初めに No 15 のメッシュ点の燃料棒温度の時間変化を 0 ~ 200 秒にわたって書く。

次に高さ 0 ~ 4 m の範囲の時刻 20 秒における燃料棒温度分布を書く。

以上に述べた以外の従来の RELAP 4 用プロットルーチンに備えられていた機能は、すべて従来通りの形式で REFLA 部分の変数に対しても適用可能である。また RELAP 部分のデータと、REFLA 部分のデータを同時にプロットすることも可能である。変数カード及び EV カードの“LABEL” 部分をblankにしておくと、自動的に各変数の内容を示す簡単なタイトルが表示される。

3.2.5 プロットジョブの入力例と作図例

次に入力データの例を Table 3.2.1 と Table 3.2.3 に示す。

一枚のタイトルカードの書き方は、RELAP 4 の場合と同じく、2 ~ 12 コラムが元の計算で用いたタイトルと一致しなければならない。第 1 コラムは

RELAP/REFLAの出力テープ …… * (星印)

RELAP 4の出力テープ …… ブランク

を記入する。

2枚目にはTI ないしはEVカード, あるいは他のX軸指定のためのカードが置かれる。以下は例に従って説明する。

(Fig. 3.2.1) X軸に炉心高さ(単位m) Y軸にREFLAで計算された燃料棒温度(単位 $^{\circ}\text{C}$)をとり, 0, 20, 40, 60, 80, 100, 150秒の7時刻についての分布を重ね書きし, 各々の曲線にシンボルマーク(○ □ ×等)をつける。

(Fig. 3.2.2) X軸に炉心高さ(m)をとり熱伝達係数($\text{kcal/hr}\cdot^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2$)の80秒における分布をリンアスケールで書く。

(Fig. 3.2.3) Fig. 3.2.3と同じ熱伝達係数だが, Y軸にLogスケールを用いて書く。

(Fig. 3.2.4) X軸に時間をとり, No 15, 46, 61, 76の4つのメッシュ点での燃料棒温度の時間変化を重ね書きする。各曲線には番号をつける。

(Fig. 3.2.5) X軸に時間をとり, キャリーオーバー率(出口流量中に水の占める質量割合)をプロットする。

Table 3.2.3はTable 3.2.1に示した入力データの, Table 3.2.4はTable 3.2.3に示した入力データのそれぞれ対応する出力リストである。なお横軸に炉心高さをとった場合にはプロットされる変数の91個の値がリスト上に出力される。

Table 3.2.1 A Sample Input Data for RELAP/REFLA Plotter Program (Case 1)

PAGE = 1

RELAP4--MOD5 PLOTTER INPUT DATA CARD IMAGE LIST.

SEQ.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.....0.....+	0.....+	0.....+	0.....+	0.....+	0.....+	0.....+	0.....+
2	REFLOOD	152PSIA	RELAP/REFLA	PLOT	DEMONSTRATION			
3	EV	100.00E04.00E0						RBE00310
4	OV	75	1					RBE00320
5	TW		8					RBE00330
6	TT		0.00E1					RBE00340
7	TT		2.00E1					RBE00350
8	TT		4.00E1					RBE00360
9	TT		6.00E1					RBE00370
10	TT		8.00E1					RBE00380
11	TT		1.00E2					RBE00390
12	TT		1.50E2					RBE00400
13	HT		8.00E1					RBE00410
14	HT	L	8	0.10	1.00E4			RBE00420
15	TT		8.00E1					RBE00430
16	HC		8					RBE00440
17	TT		8.00E1					RBE00450
18	HR		8					RBE00460
19	TT		8.00E1					RBE00470
20	OV	25	1					RBE00480
21	TL		8					RBE00490
22	TT		4.00E1					RBE00500
23	TT		8.00E1					RBE00510
24	AG		8					RBE00520
25	TT		8.00E1					RBE00530
26	UG		8					RBE00540
27	TT		8.00E1					RBE00550
								RBE00560
								RBE00570
SEQ.	1.....0.....+	2.....+	3.....+	4.....+	5.....+	6.....+	7.....+	8.....+

HEAT TRANSFER COEFF. (KCAL/HR/C/M2)

} Fig 3.2.1

} Fig 3.2.2

} Fig 3.2.3

Table 3.2.2 Output List of RELAP/REFLA Plotter Program for Sample Input (Case 1)

```

RELAP4 MOD5 PLOT PACKAGE * U6/23/76 HCY *
REFLOOD152PSIA RELAP/REFLA PLOT DEMONSTLATION
EV 0 10 0,0 4,00000E+00 0,0
OV 7 1
78-11-27

THE TAPE IS A RELAP4 DATA TAPE,
TITLE TO BE USED ON PLOTS IS
REFLOOD152PSIA RELAP/REFLA PLOT DEMONSTLATION RELAP/REFLA (MOD/0) 78-11-25
ORIGINAL PROBLEM WAS TITLED
REFLOOD152PSIA R-R SAMPLE4 *
AND HAD 26 VOLUMES, 30 JUNCTIONS AND 14 SLABS.
VRBL VRBL LOG AXIS MINIMUM MAXIMUM SCALING .....LABEL.....
TYPE INDX PLOT LNTH
TW 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 0,0
TIME= 2,00000E+01
TIME= 4,00000E+01
TIME= 6,00000E+01
TIME= 8,00000E+01
TIME= 1,00000E+02
TIME= 1,50000E+02
HT 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0 HEAT TRANSFER COEFF. (KCAL/HR/C/M2)
TIME= 8,00000E+01
HT 0 L 8 1,00000E-01 1,00000E+04 0,0
TIME= 8,00000E+01
HC 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 8,00000E+01
HR 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 8,00000E+01
OV 2 1 8 0,0 0,0 0,0
TL 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 4,00000E+01
AG 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 8,00000E+01
VIC 0 8 0,0 0,0 0,0 0,0
TIME= 8,00000E+01
    
```

END OF PLOTTING REQUEST.

SURF,TEMP C	ELEVATION(M)	TIME=	0.0	SEC
SURF,TEMP C	ELEVATION(M)	VALUE		
4.00000E-02	0.0		1.06894E+02	
8.00000E-02			2.00000E+02	
1.20000E-01			2.02000E+02	
1.60000E-01			2.09000E+02	
2.00000E-01			2.18000E+02	
2.40000E-01			2.26000E+02	
2.80000E-01			2.34000E+02	
3.20000E-01			2.42000E+02	
3.60000E-01			2.50000E+02	
4.00000E-01			2.60000E+02	
4.40000E-01			2.70000E+02	
4.80000E-01			2.80000E+02	
5.20000E-01			2.90000E+02	
5.60000E-01			3.06000E+02	
6.00000E-01			3.22000E+02	
6.40000E-01			3.38000E+02	
6.80000E-01			3.54000E+02	
7.20000E-01			3.70000E+02	
7.60000E-01			3.86000E+02	
8.00000E-01			4.02000E+02	
8.40000E-01			4.18000E+02	
8.80000E-01			4.34000E+02	
9.20000E-01			4.50000E+02	
9.60000E-01			4.66000E+02	
1.00000E+00			4.82000E+02	
1.04000E+00			4.90000E+02	
1.08000E+00			4.99000E+02	
1.12000E+00			5.08000E+02	
1.16000E+00			5.16000E+02	
1.20000E+00			5.24000E+02	
1.24000E+00			5.32000E+02	
1.28000E+00			5.38000E+02	
1.32000E+00			5.45000E+02	
1.36000E+00			5.51000E+02	
1.40000E+00			5.58000E+02	
1.44000E+00			5.65000E+02	
1.48000E+00			5.71000E+02	
1.52000E+00			5.76000E+02	
1.56000E+00			5.81000E+02	
1.60000E+00			5.85000E+02	
1.64000E+00			5.90000E+02	
1.68000E+00			5.94000E+02	
1.72000E+00			5.98000E+02	
1.76000E+00			6.01000E+02	
1.76000E+00			6.03000E+02	

2.240001E+00	6.02466E+02
2.280001E+00	6.08285E+02
2.320001E+00	6.11348E+02
2.36000E+00	6.14223E+02
2.40000E+00	6.16663E+02
2.44000E+00	6.18531E+02
2.48000E+00	6.19870E+02
2.52000E+00	6.20488E+02
2.56000E+00	6.20499E+02
2.60000E+00	6.20058E+02
2.64000E+00	6.19043E+02
2.68000E+00	6.17465E+02
2.72000E+00	6.15337E+02
2.76000E+00	6.12675E+02
2.80000E+00	6.09485E+02
2.84000E+00	6.05783E+02
2.88000E+00	6.01735E+02
2.92000E+00	5.96251E+02
2.96000E+00	5.90173E+02
3.00000E+00	5.83517E+02
3.04000E+00	5.76118E+02
3.08000E+00	5.68290E+02
3.12000E+00	5.59898E+02
3.16000E+00	5.51460E+02
3.20000E+00	5.42544E+02
3.24000E+00	5.33109E+02
3.28000E+00	5.23154E+02
3.32000E+00	5.12682E+02
3.36000E+00	5.01661E+02
3.40000E+00	4.90259E+02
3.44000E+00	4.78044E+02
3.48000E+00	4.65136E+02
3.52000E+00	4.50013E+02
3.56000E+00	4.36109E+02
3.60000E+00	4.21808E+02

*** READ END OF FILE UNIT= 1 ***

END OF FILE AFTER 2526 PLOT RECORDS WERE READ. IOK = 3

NUMBER OF PLOT RECORDS = 2526, NUMBER OF ERRORS = 0.

NUMBER OF POINTS FOR EACH REQUEST

Table 3.2.3 A Sample Input Data for RELAP/REFLA Plotter Program (Case 2)

"RELAP4-MOD5 PLOTTER" INPUT DATA CARD IMAGE LIST.

PAGE= 1

SEQ.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	REFLOOD152PSIA	RELAP/REFLA	PLOT DEMONSTRATION					RBE00310
3	T1	100.00E02	00E2					RBE00320
4	OV	4N	1					RBE00330
5	TW	15	8	0.0	800.0			RBE00340
6	TW	46	8	0.0	800.0			RBE00350
7	TW	61	8	0.0	800.0			RBE00360
8	TW	76	8	0.0	800.0			RBE00370
9	VQ	1	1					RBE00380
10	TQ	1	1					RBE00400
11	VO		7					RBE00420
12	CF		7					RBE00430
13	OL		7					RBE00440
14	OV	5N	1					RBE00450
15	ZB	1	9	0.00	3.60			RBE00460
16	ZB	2	9	0.00	3.60			RBE00470
17	ZB	3	9	0.00	3.60			RBE00480
18	ZB	4	9	0.00	3.60			RBE00490
19	ZB	7	9	0.00	3.60			RBE00500
20	OV	3S	3					RBE00505
21	ZB	5	9	0.00	3.60			RBE00510
22	ZB	6	9	0.00	3.60			RBE00520
23	ZB	7	9	0.00	3.60			RBE00530
24	ML	1	8	0.0	8.00			RBE00540
25	JW	12	8	-200.0	800.0			RBE00550
26	JW	1	8					RBE00560
27	AP	1	8					RBE00570
								RBE00580
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

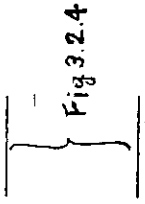


Fig. 3.2.5

MOVEMENT OF BOUNDARIES

CORE INLET FLOW (LB/S)
COKE OUTLET FLOW (LB/S)

従来からあり
RELAP4の取扱

Table 3.2.4 Output List of RELAP/REFLA Plotter Program for Sample Input (case 2)

RELAP4 MOD5 PLOT PACKAGE * U6/23/76 RCY *
REFLOOD152PSIA RELAP/REFLA PLOT DEMONSTATION

78-11-27

TI 0 10 0.0 2.00000E+02 0.0
OV 4 1

THE TAPE IS A RELAP4 DATA TAPE.

TITLE TO BE USED ON PLOTS IS

REFLOOD152PSIA RELAP/REFLA PLOT DEMONSTATION RELAP/REFLA (MOD/0) 78-11-25

ORIGINAL PROBLEM WAS TITLED

REFLOOD152PSIA R-R SAMPLE4

AND HAD 26 VOLUMES, 30 JUNCTIONS AND 14 SLABS.

VRBL TYPE	VRBL INDEX	LOG AXIS PLOT LNTH	MINIMUM	MAXIMUM	SCALING	.....LABEL.....
TW	15	8	0.0	8.00000E+02	0.0	
TW	46	8	0.0	8.00000E+02	0.0	
TW	61	8	0.0	8.00000E+02	0.0	
TW	76	8	0.0	8.00000E+02	0.0	
VQ	1	0	0.0	0.0	0.0	
TQ	1	8	0.0	0.0	0.0	
VI	0	7	0.0	0.0	0.0	
VO	0	7	0.0	0.0	0.0	
CF	0	7	0.0	0.0	0.0	
QL	0	7	0.0	0.0	0.0	
OV	5	1				
ZB	1	9	0.0	3.60000E+00	0.0	MOVEMENT OF BOUNDARIES
ZB	2	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ZB	3	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ZB	4	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ZB	7	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
OV	3	3				
ZB	5	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ZB	6	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ZB	7	9	0.0	3.60000E+00	0.0	
ML	1	8	0.0	8.00000E+00	0.0	
JW	12	8	-2.00000E+02	8.00000E+02	0.0	CORE INLET FLOW (LB/S)
SURF,TEMP C	E15					

*** READ END OF FILE UNIT= 1 ***

```

CV      3      .....
ZB      5      0.0
ZB      6      0.0
ZB      7      0.0
ML      1      0.0
JW      12     -2.000000E+02
SURF,TEMP C  E15

```

CORE INLET FLOW (LB/S)

```

.....
3.600000E+00
3.600000E+00
3.600000E+00
8.000000E+00
8.000000E+02
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0

```

```

*** READ END OF FILE UNIT= 1 ***
END OF FILE AFTER 2526 PLOT RECORDS WERE READ, IOK = 3
NUMBER OF PLOT RECORDS = 2526, NUMBER OF ERRORS = 0,

```

```

NUMBER OF POINTS FOR EACH REQUEST
2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526 2526

```

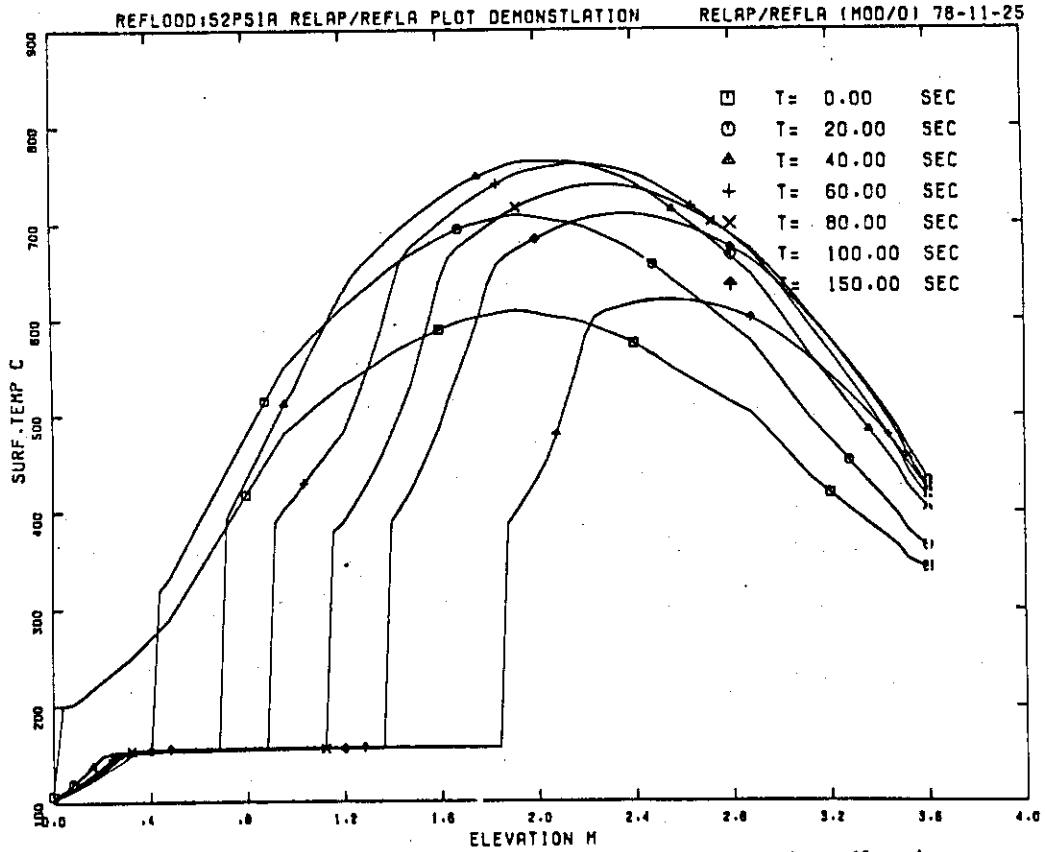


Fig. 3.2.1 Overlay Plot of Fuel Temperature Distributions for Various Times during Reflood (from Case 1)

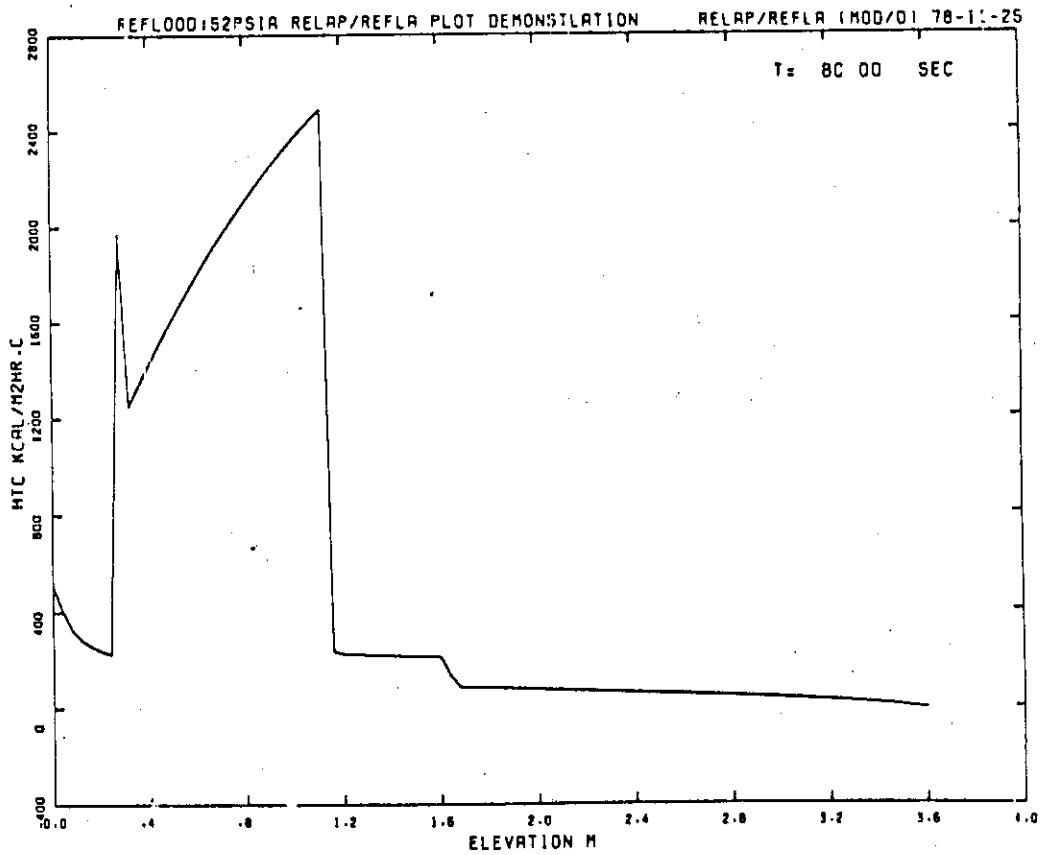


Fig. 3.2.2 Axial Distribution of Heat Transfer Coefficient at 80 Seconds during Reflood in Linear Scale (from Case 1)

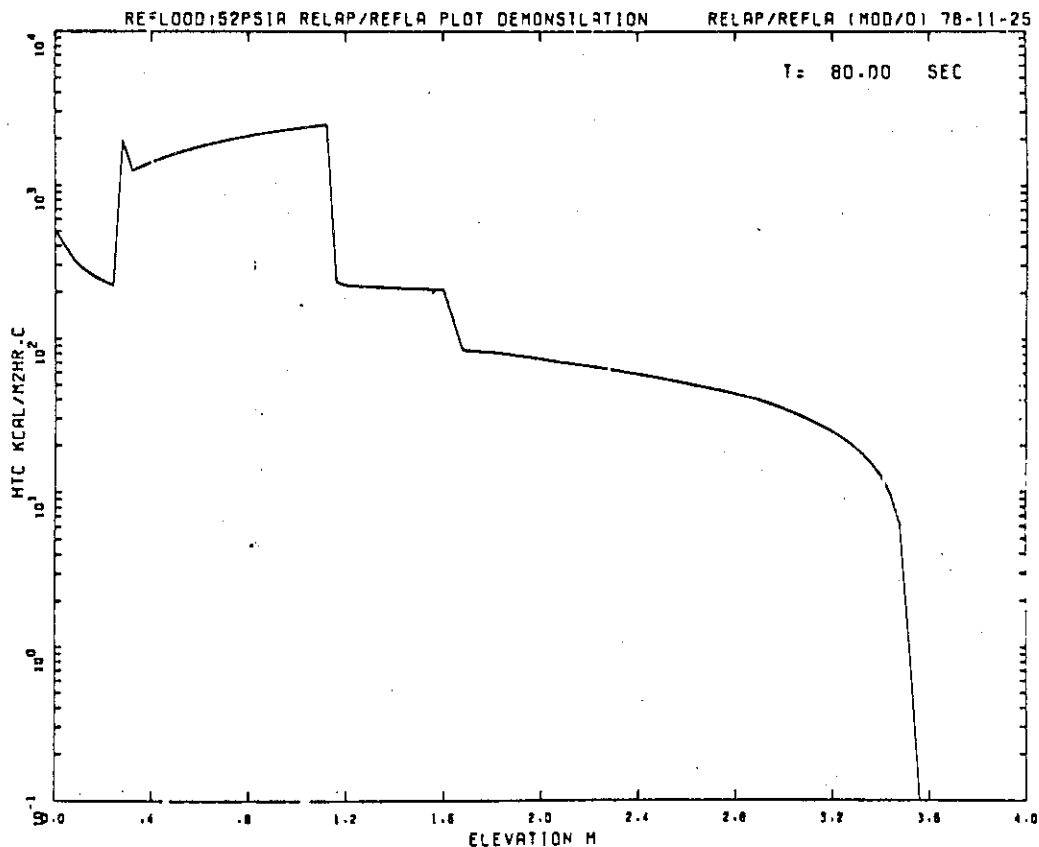


Fig. 3.2.3 Axial Distribution of Heat Transfer Coefficient at 80 Seconds during Reflood in Logarithmic Scale (from Case 1)

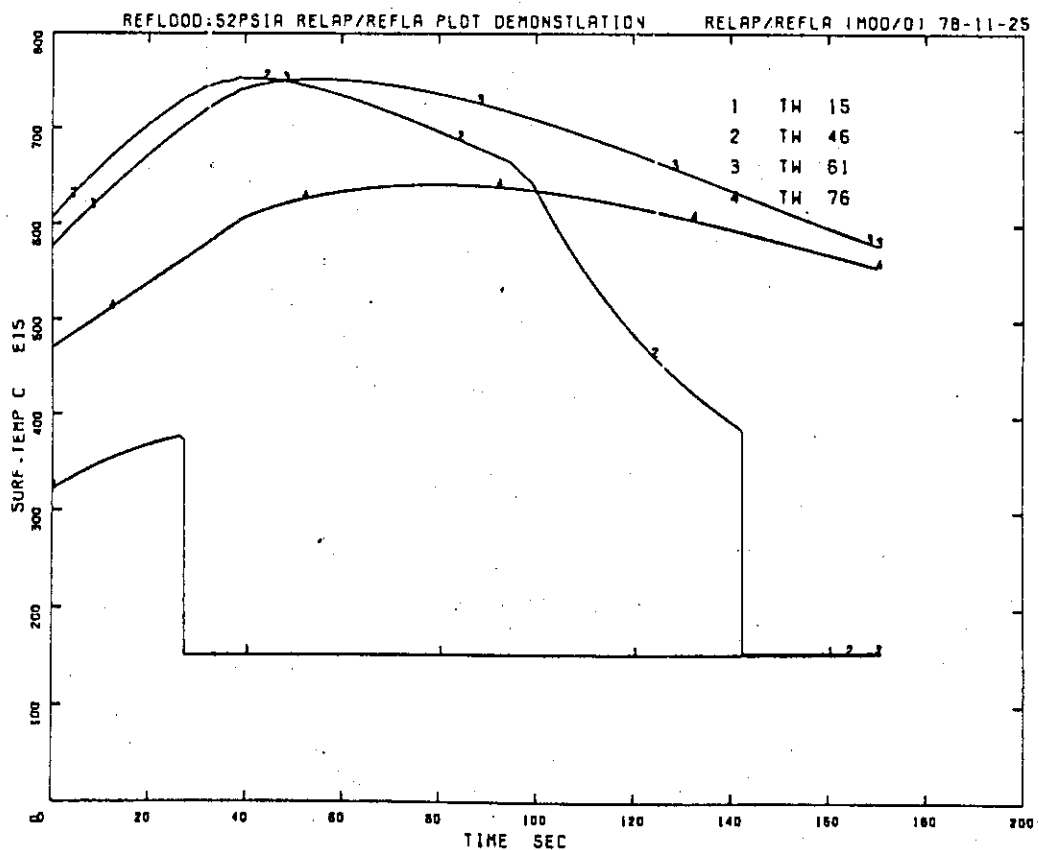


Fig. 3.2.4 Overlay Plot of Rod Temperature for Various Elevations (from Case 2)

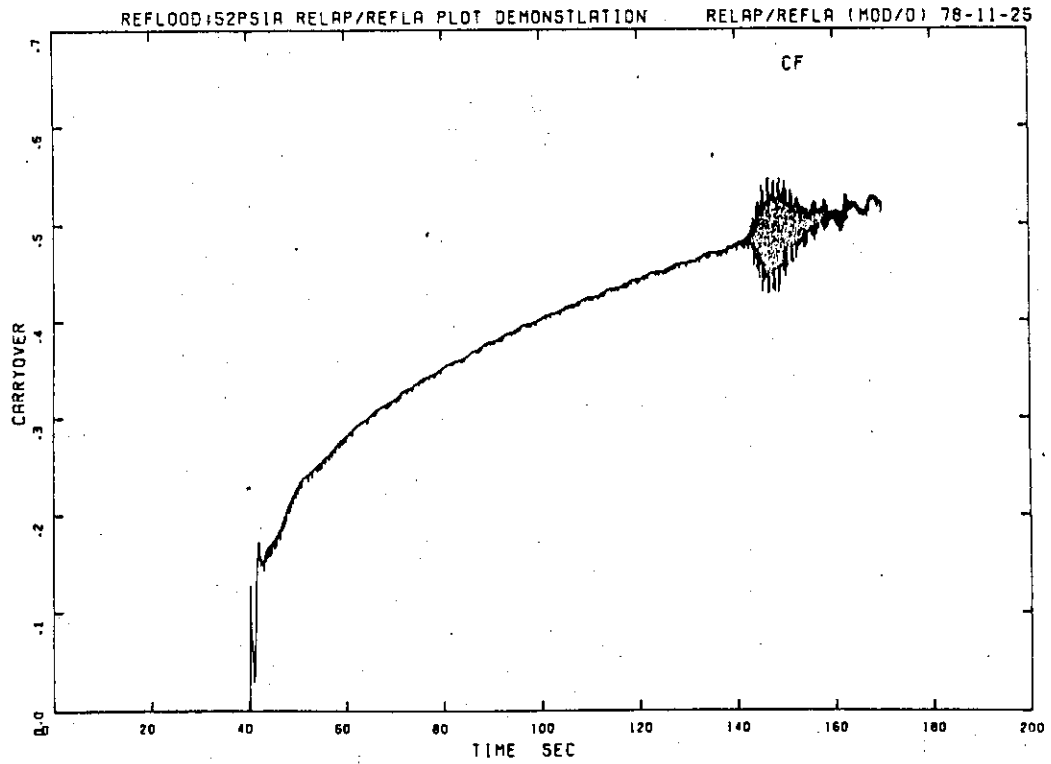


Fig. 3.2.5 Carryover Rate Fraction Calculated By RELAP/REFLA (from Case 2)

3.3 CONTEMPT-LT(EM) 作成のための改良

3.3.1 はじめに

LWRのLOCA時における格納容器内の圧力は、格納容器設計及びECCSの特性評価において重要な量である。格納容器内壁及び構造材表面での蒸気凝縮による格納容器気相部からの熱除去が圧力上昇を抑える上で支配的な働きをする。CONTEMPT-LT/022¹⁹⁾²⁰⁾には蒸気凝縮の熱伝達係数を与える関係式として内田データ²⁸⁾の内挿式が内蔵されているが、CVTR (Carolina Virginia Tube Reactor)の実験解析等³⁰⁾³¹⁾から内田データはブローダウン中は熱伝達係数を過小評価(すなわち内圧ピークを高めめに評価)するという結果が出ている。一方、格納容器の設計及び圧力解析には田上の式³²⁾が用いられることが多い³³⁾。CVTRの実験解析³¹⁾によると、熱伝達係数のブローダウンの最大値 h_{max} に対して田上の式を4倍したものをを用いると実験のピーク圧力がよく再現できることが示されている。

大破断LOCA時のECCS性能評価においては、通常、格納容器圧力が低い程、被覆管表面最高温度(Peak Cladding Temperature = PCT)を高く計算するので、性能評価指針では格納容器圧力を、なるべく低く見積ることを要求している。米国NRCはBranch Technical Position CSB6-1, "Minimum Containment Pressure Model for PWR ECCS Performance Evaluation"において計算方法を定めている中で、格納容器内壁及び構造材表面での凝縮熱伝達係数について使用すべき関係式を定めている。その式は田上-内田の式を修正したような型になっている。CONTEMPT-LT(EM)は、CONTEMPT-LT/022を上記の型の凝縮熱伝達係数が使用できるように修正したものである。

ここでは新たに組み込んだ関係式、修正箇所、使用方法、出力例等について説明する。

3.3.2 改良点

(1) 新たに組み込まれた凝縮熱伝達係数の関係式

(i) ブローダウン期間

$$h = f_4 \cdot \{ f_2 + (h_{max} - f_2) (t/t_{BD}) \} \quad (3.3.1)$$

(ii) ブローダウン終了後の期間

$$h = f_4 \cdot \{ h_{stag} + (h_{max} - h_{stag}) e^{-d(t-t_B)} \} \quad (3.3.2)$$

ここで $h_{max} = f_1 \cdot h_{max}(\text{Tagami})$

$$h_{max}(\text{Tagami}) = 725 \left(\frac{Q_{BD}}{t_{BD} \cdot V} \right)^{0.62}$$

$$h_{stag} = f_3 \cdot h_{uchida}$$

h : 凝縮熱伝達係数 [Btu/hr · ft² · °F]

t : 破断開始からの時間 (秒)

t_{BD} : ブローダウン持続時間 (秒)

Q_{BD} : ブローダウン期間中に格納容器内へ放出されるエネルギー総和 (Btu)

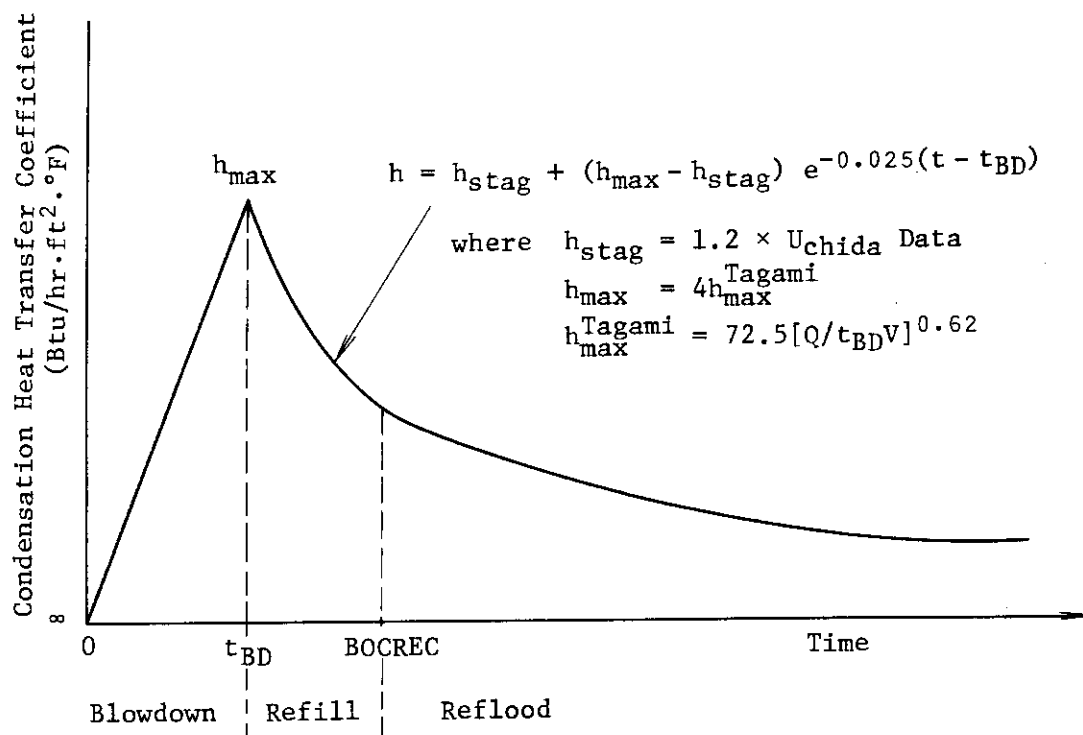
V : 格納容器気相部自由体積 (ft³)

h_{uchida} : Table 3.3.1 から内挿して求めたもの。

米国 NRC Branch Technical Position CSB 6-1 では、上の (3.3.1) (3.3.2) の式に対して $f_1 = 4$, $f_2 = 8$, $f_3 = 12$, $f_4 = 10$, $d = 0.025$ の各値を使用するように定められている。Fig.3.3.1 に h の時間変化を図式的に示す。

Table 3.3.1 Uchida Heat Transfer Coefficient

UCHIDA HEAT TRANSFER COEFFICIENTS			
Mass Ratio (lb air/lb steam)	Heat Transfer Coefficient (Btu/hr-ft ² -°F)	Mass Ratio (lb air/lb steam)	Heat Transfer Coefficient (Btu/hr-ft ² -°F)
50	2	3	29
20	8	2.3	37
18	9	1.8	46
14	10	1.3	63
10	14	0.8	98
7	17	0.5	140
5	21	0.1	280
4	24		



- t_{BD} : Time Interval to End of Blowdown (sec)
- V : Net Free Containment Volume (ft³)
- Q : Primary Coolant Energy Released to Containment by t_{BD} . (Btu)
- h : Condensation Heat Transfer Coefficient (Btu/hr-ft²-°F)

Fig. 3.3.1 Schematic Behavior of Condensation Heat Transfer Coefficient.

(2) プログラム改造箇所

(1)に述べた関係式を使用するために CONTEMPT-LT/022 を修正したサブルーチンはインプット・ルーチン (INPRO 2) と HTC を計算するルーチン (HEAT) の 2 つであり、修正箇所は Table 3.3.2 に示してある。

(3) 使用方法

CONTEMPT-LT (EM) の入力マニュアルは CONTEMPT-LT/022 の入力マニュアル²⁰⁾ を以下のように修正したものとなる。

- Page C - 3 ; 下から 5 行目以下削除
- Page C - 3 ; 下から 5 行目以下次の文を挿入

12, the heat transfer coefficient is calculated from Tagami - Uchida type equation and needed constants are entered on Word 1 to 6 of card 420001.

13, the heat transfer coefficient which is f_4 times that of type 12, and the constant f_4 is entered on Word 1 of card 420002 .

14, 15 or greater (up to 26 max), the heat transfer coefficient used is the heat transfer coefficient of the same type number.

These heat transfer coefficient are entered on card 4200XX ($03 \leq XX \leq 20$).

For example entering fifteen would cause the heat transfer coefficient type 15 entered on Word 2 of card 420003 to be used.

- Page C - 5 ; 下から 7 行目以下削除
- Page C - 5 ; 下から 7 行目以下次の文を挿入

Card 420001 (Constants for Tagami -Uchida Type Heat Transfer Coefficient)

Word 1 ; Blowdown duration time (sec)

Word 2 ; h_{max} of Tagami's equations = $72.5 (Q_{BD}/t_{BD} \cdot V)^{0.62}$

Word 3 ; f_1

Word 4 ; f_2

Word 5 ; f_3

Word 6 ; d

Card 420002

Word 1 ; f_4

Card 4200 XX (Miscellaneous Heat-Transfer Coefficients)

XX = 03, 04, 20

These cards are needed only if any heat transfer coefficient type 14 through 26 was specified on any 1YY 400 card.

Word 1 ; Heat transfer coefficient type 14.

An arbitrary number of additional values may be entered on this and other cards as needed for type 14, 15, 26.

Table 3.3.2-(1) List of Modified and Added Statements in CONTEMPT-LT(EM)

SUBROUTINE HEAT		
	KK=1	HEAC1150
	CALL SRCHF (TEMP,HJPT,2,15,1,KK,FR,ERROR)	HEAC1170
	CALL INTRP (HJPT,2,15,2,KK,FR,TEMP)	HEAC1180
C	FOLLOWING STATEMENT WAS ADDED TO USE TAGAMI-UCHIDA TYPE EQUATION	HEAC1182
	IF(IST01.GE.13) GO TO 840	HEAC1184
	GO TO 268	HEAC1190
263	TEMP = .4	HEAC1200
	GO TO 268	HEAC1210
264	TEMP = 10000.	HEAC1220
	GO TO 268	HEAC1230
265	IF (IST4 .LT. 0 .AND. LSWMA) GO TO 262	HEAC1240
C	LSWMA = FALSE UNTIL MASS-ADDITION TABLE 1ST HAS 0 MASS, FOR H=-5	HEAC1250
C	FOR H= -5 OPTION, USE UCHIDA AFTER BLOWDOWN DONE	HEAC1250
	ST01 = T	HEAC1270
	CALL TABLU (ST01,HTCT,114,J14,2,TEMP,ERROR)	HEAC1280
<hr/>		
276	ST01 = TV(NHT)	HEAC1390
	TMP = DTV(NHT)	HEAC1400
C	FOR BEST RESULTS SHOULD BALANCE TV,TL AFTER THIS CALL HEAT	HEAC1410
	GO TO 275	HEAC1420
273	IF (NHT .EQ. 0) GO TO 271	HEAC1430
	IF (MWTL(NHT) .EQ. 0.) GO TO 276	HEAC1440
	ST01 = TL(NHT)	HEAC1450
	TMP = GTL(NHT)	HEAC1460
275	J16 = 1	HEAC1470
	CALL TABLU (ST01,HTCTP,116,J16,2,TEMP,ERROR)	HEAC1480
	IF(ERROR) GO TO 914	HEAC1490
	GO TO 268	HEAC1500
267	IF ((IST01-1) .GE. 50) GO TO 274	HEAC1510
C		HEAC1511
C	FOLLOWING STATEMENTS WERE ADDED BY F.TANABE(JAERI)	HEAC1512
C	TO USE TAGAMI-UCHIDA TYPE HTC EQUATION OF STEAM CONDENSING	HEAC1513
C	MODIFICATION WAS DONE ON JUNE 10,1977	HEAC1514
C		HEAC1515
C		HEAC1516
800	CONTINUE	HEAC1517
	IF((IST01-1).GE.14) GO TO 860	HEAC1518
	TBD = HTC(1)	HEAC1519
	HMXTGM= HTC(2)	HEAC1520
	F1 = HTC(3)	HEAC1521
	F2 = HTC(4)	HEAC1522
	F3 = HTC(5)	HEAC1523
	DD = HTC(6)	HEAC1524
	HMAX = F1 * HMXTGM	HEAC1525
	TSEC = T *3600.	HEAC1526
	IF(TSEC.GT.TBD) GO TO 820	HEAC1527
	TEMP = F2 +(HMAX-F2)*(TSEC/TBD)	HEAC1528
	GO TO 850	HEAC1529
820	CONTINUE	HEAC1530
	GO TO 262	HEAC1531
840	CONTINUE	HEAC1532
	HUCHID= TEMP	HEAC1534
	HSTAG = F3 * HUCHID	HEAC1535
	TEMP = HSTAG + (HMAX - HSTAG) *DEXP(-DD*(TSEC - TBD))	HEAC1536
850	CONTINUE	HEAC1537
	IF(IST01.EQ.13) GO TO 268	HEAC1538
	F4 = HTC(7)	HEAC1539
	TEMP = F4 * TEMP	HEAC1540
	GO TO 268	HEAC1541
860	TEMP = HTC(IST01-7)	HEAC1542
C		HEAC1543
C	ABOVE STATEMENTS WERE ADDED BY F.TANABE	HEAC1544
C		HEAC1545

Table 3.3.2-(2)

SUBROUTINE INPRO2

800	WRITE(6,119) J,TUCVHC(I),TUCVHC(I+1)	IPR23580
119	FORMAT(5X15,10X1PE17.6,10XE17.6)	IPR23590
	J = J + 1	IPR23600
	I = I + 2	IPR23610
	IF(I .LE. 113) GO TO 800	IPR23620
	DD 281 I =1,NSL	IPR23630
	IF (BTD(1,I).LT.7 .AND. BTN(1,I).LT.7) GO TO 281	IPR23640
	IF (BTD(1,I).GE.7 .AND. BTD(1,I).LE.26) GO TO 290	IPR23650
	IF (BTN(1,I).GE.7 .AND. BTN(1,I).LE.26) GO TO 290	IPR23660
281	CONTINUE	IPR23670
	GO TO 280	IPR23680
290	ICS(1) = 420001	IPR23690
	ICS(2) = 420020	IPR23700
	ICS(3) = 1	IPR23710
	ICS(4) = 20	IPR23720
	ICS(6) = 1	IPR23730
	CALL INP2 (ARR,HTC,ICS)	IPR23740
	IF (ICS(6).EQ.-1) GO TO 900	IPR23750
	I = ICS(6)	IPR23760

C FOLLOWING STATEMENTS WERE MODIFIED BY F.TANABE(JAERI) IPR23761

C TO USE TAGAMI-UCHIDA TYPE HTC OF STEAM CONDENSING IPR23762

C MODIFICATION WAS DONE ON JUNE 10,1977 IPR23763

C IPR23764

C IPR23765

WRITE(6,620) IPR23766

620 FORMAT(1HC,' TAGAMI-UCHIDA TYPE HTC EQUATION (TYPE12 OR TYPE13)'/ IPR23767

1' (1) BLOWDOWN PERIOD H=F4*(F2+(HMAX-F2)*(T/TBD)'/ IPR23768

2' (2) POST BLOWDOWN PERIOD H=F4*(HSTAG+(HMAX-HSTAG)*EXP(-DD(T- IPR23769

3BD)))/ IPR23770

4' WHERE HMAX=F1*HMAX(TAGAMI) ,HMAX(TAGAMI)=72.5*(QBD/V/ IPR23771

5TBD)**0.62 '/ IPR23772

6' HSTAG=F3*HUCHILA '/// IPR23773

WRITE(6,625) IPR23774

WRITE(6,630) (HTC(J),J=1,6) IPR23775

625 FORMAT(26X,3HTBD,2X12HHMAX(TAGAMI),8X2HF1,10X2HF2,10X2HF3,10X2HDD IPR23776

1,10X2HF4) IPR23777

630 FORMAT(14X,6HTYPE12,6F12.3,7X5H1.00C) IPR23778

IF(I.EQ.6) GO TO 660 IPR23779

WRITE(6,640) (HTC(J),J=1,7) IPR23780

640 FORMAT(14X,6HTYPE13,7F12.3) IPR23781

IF(I.EQ.7) GO TO 660 IPR23782

WRITE(6,120) (J,HTC(J),J=8,1) IPR23783

C IPR23784

C ABOVE STATEMENTS WERE ADDED BY F.TANABE IPR23785

C IPR23786

C WRITE (6,120) (J,HTC(J),J=1,1) IPR23790

Table 3.3.3 List of Modified Output Format in CONTEMPT-LT(EM)

TABLES COMMON TO ALL HEAT SLABS

THERMAL CONDUCTIVITY AND VOLUMETRIC HEAT CAPACITY TABLE

COMPOSITION NO., THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT CAPACITY

1	9,390000D+00	6,012000D+01
2	2,927000D+01	6,009000D+01
3	2,470000D+00	6,482900D+02
4	1,008000D+01	2,695000D+01
5	9,740000D+00	2,801000D+01
6	3,800000D-01	6,133000D+01

TAGAMI-UCHIDA TYPE HTC EQUATION (TYPE12 OR TYPE13)
 (1) BLOWDOWN PERIOD $H=F4*(F2+(HMAX-F2))*(T/TBD)$
 (2) POST BLOWDOWN PERIOD $H=F4*(HSTAG+(HMAX-HSTAG)*EXP(-DD*(T-TBD)))$
 WHERE $HMAX=F1*HMAX(TAGAMI)$, $HMAX(TAGAMI)=72,5*(QED/V/ TBD)**0,62$
 $HSTAG=F3*HUCHIDA$

TYPE12	TBD	HMAX(TAGAMI)	F1	F2	F3	DD	F4
TYPE13	13,500	700,000	4,000	8,000	1,200	0,025	1,000
	13,500	700,000	4,000	8,000	1,200	0,025	0,400

TABLE OF HEAT TRANSFER COEFF., TYPE(J=6), HEAT TRANSFER COEFF.,

8	1,000000D+01	9	1,000000D+02
10	1,000000D+03	11	1,000000D+04

TABLE OF TIME, HEAT TRANS, COEFF, (TYPE 5)

0,0	8,000000D+00	4,722220D-03	2,939800D+03
5,277780D-03	2,812900D+03	6,944440D-03	2,463020D+03
9,722220D-03	1,996630D+03	1,388890D-02	1,477630D+03
1,944440D-02	1,028810D+03	2,500000D-02	7,565900D+02
3,611110D-02	4,913330D+02	4,444440D-02	4,098810D+02
5,000000D-02	3,811890D+02	5,555560D-02	3,637860D+02
6,944440D-02	2,748000D+02	8,333330D-02	2,748000D+02
1,111110D-02	2,592000D+02	1,388890D-02	2,400000D+02
1,666670D-02	2,400000D+02	1,700000D-01	2,400000D+02

3.4 TOODEE2-J1のための改良・修正

3.4.1 Zr - H₂O 反応速度式の改良

1) はじめに

TOODEE 2 コードによる計算で、Baker-Just の式以外の酸化反応速度式を用いて被覆管酸化量についての感度解析を行えることが望ましい。そこで TOODEE 2 (および TOBUNRAD) に次の 4 つの酸化反応速度式を組み込む作業を行った。

i) 川崎の式 (BE)³⁴⁾

実験データに best fit させた式

ii) 川崎の式 (EM)³⁴⁾

実験データの誤差を考慮して安全側に評価した式

iii) 池田の式

iv) 任意の放物線則の式

2) 反応式の変換

1) で示した各式とも酸化は放物線則に従って進行し酸化による重量増加は次式で表わされる。

$$W_g^2 = k_w t \quad \dots\dots\dots (3.4.1)$$

k_w : 放物線則定数 [$g^2 Q_2 / cm^4 \cdot sec$]

t : 時間 [sec]

ここで各式の k_w は次のように表わされる。

川崎の式 (BE) : $k_w = 0.468 \exp(-40710/RT) \dots\dots\dots (3.4.2)$

川崎の式 (EM) : $k_w = 0.6078 \exp(-40710/RT) \dots\dots\dots (3.4.3)$

池田の式 : $k_w = 0.141 \exp(-37100/RT) \dots\dots\dots (3.4.4)$

R : 気体定数 1.987 [cal/mol/°K]

T : 温度 [°K]

Fig. 3.4.1 には Baker-Just の式を含めて各 k_w を温度の関数として示した。川崎の式 (EM) は、すべてのデータ点の誤差範囲が直線の下になるように川崎の式 (BE) を上方へ平行移動したものである。

さて TOODEE 2 コードでの酸化層厚さは次のように計算される。時刻 t から $t + \Delta t$ の間に酸化層厚さが r_0 から $r_0 + \Delta r$ に変化するとすれば、

$$(r_0 + \Delta r)^2 - r_0^2 = k \Delta t$$

$$\therefore \Delta r = \sqrt{r_0^2 + k \Delta t} - r_0$$

ここで定数の k の単位は (ft^2 / hr) であるので式 (3.4.2) ~ (3.4.4) における k_w を単位変換する必要がある。また (3.4.1) における W_g は重量増加であるから Z_r と反応した酸素の量と考えてよい。したがって川崎の式 (BE) に対しては

$$0.468 [g_{Q_2}^2 / cm^4 \cdot sec] \left\{ \frac{91.22 [g_{Zr}]^2}{32.00 [g_{Q_2}]} \right\} \frac{3600 [sec/hr]}{\{6.5 [g_{Zr}/cm^3]\}^2 \{3048 [cm/ft]\}^2}$$

$$= 0.3488 [ft^2/hr]$$

ここで 91.22 [g_{Zr}], 32.00 [g_{Q₂]}

 は、それぞれジルコニウムと酸素の 1 グラム分子量を示す。また 6.5 [g_{Zr}/cm³] は Zr の密度である。

同様にして、

(川崎 (EM)) $0.6078 [g_{Q_2}^2 / cm^4 sec] = 0.4530 [ft^2/hr]$

(池田) $0.141 [g_{Q_2}^2 / cm^4 sec] = 0.1051 [ft^2/hr]$

また指数関数の引数は

(川崎) $-40710 / R [^{\circ}k]$
 $= -40710 [cal/mol] / 1.987 [cal/mol/^{\circ}k]$
 $= -40710 [cal/mol] \times 18 [^{\circ}R/^{\circ}k] / 1.987 [cal/mol/^{\circ}k]$
 $= -36879 [^{\circ}R]$

(池田) $-37100 / R [^{\circ}k] = -33608 [^{\circ}R]$

以上をまとめると次のようになる。

川崎の式 (BE) $k = 0.3488 \exp(-36879/T) [ft^2/hr]$ (3.4.5)

川崎の式 (EM) $k = 0.4530 \exp(-36879/T) [ft^2/hr]$ (3.4.6)

池田の式 $k = 0.1051 \exp(-33608/T) [ft^2/hr]$ (3.4.7)

ここで温度 T は [^{\circ}R] で測る。

参考までに Baker-Just の式の k_w, k を示す。

$k_w = 412 \exp(-45500/RT)$ (3.4.8)

$k = 3.054 \exp(-41218/T)$ (3.4.8)

3) プログラムの変更

TOODEE 2 の入力には AVAIL (k) という配列があってオプションの指定あるいはパラメータの入力に用いられている。実際には AVAIL (1) ~ AVAIL (68) までが使用されていて残りの AVAIL (69) 以後は未使用状態であった。そこで以下に示すような入力データにより酸化反応速度式の指定ができるようにプログラムを変更した。

- AVAIL (70) = 0. 又は入力なし: Baker-Just の式
- = 1. : 川崎の式 (BE)
- = 2. : 川崎の式 (EM)
- = 3. : 池田の式
- = 4. : 上記以外の式

AVAIL (71) = a [ft²/hr] }
 AVAIL (72) = b [^{\circ}R] } : AVAIL (70) = 4 の時のパラメータ

但し $k = a \exp(-b/T)$

AVAIL (73) = 0. 又は入力なし: 反応熱はプログラム内蔵の値 (1.13892×10^6 Btu/ft³)

を用いる。

= 1. : 反応熱には AVAIL (74) で入力される値を用いる。

AVAIL (74) = Q : 反応熱 [Btu/ft³]

TOODEE 2 を複数個用いている TOBUNRAD についても同様の修正を行った。修正サブルーチンは

(TOODEE 2) INITEM, ZRWAT

(TOBUNRAD) INITMA, INITMB, ………, INITMJ

ZRWATA, ZRWATB, ………, ZRWATJ

Table 3.4.1 に INITEM, ZRWAT の具体的な修正箇所を示す。INITMA ~ INITMJ, ZRWATA ~ ZRWATJ の修正箇所も同一である。

4) チェック計算

i) 単体テスト

簡単なメインプログラムを作り、サブルーチン ZRWAT のみの単体テストを行った。1700°F ~ 2500°F の 8 通りの温度で 30 分間の酸化層厚さの増加を計算した。Fig. 3.4.2 は初期酸化層厚さ 0 で川崎の式 (BE) (式 (3.4.5)) により計算した結果である。各温度での酸化層厚さは時間とともに放物線状に変化し、各曲線の係数はそれぞれの温度について式 (3.4.5) より求めた値と一致することが確認できた。(3.4.6) 及び (3.4.7) の 2 式についても同様のチェックを行った。これらチェック計算により三つの反応速度式は正しくプログラミングされたことが確認できた。

ii) サンプル問題によるチェック

TOODEE 2 コードのための標準問題 (WREM コードパッケージのチェック計算に用いた陸上 PWR のデータ) を、(3.4.5) ~ (3.4.8) の 4 つの式を用いて計算を行い比較した。Fig. 3.4.3 には各ケースの PCT ノード及び破裂ノードの被覆管表面温度を示す。被覆管表面温度が低い間は各ケース間で温度にはほとんど差がなく、PCT ノードの温度が 1700°F を越えるころより僅かながら差を生じるが、全体としてさほど大きな差ではなく、Baker-Just の式と川崎の式 (BE) を用いた 2 ケース間で最大約 60°F 程度である。Fig. 3.4.4 には PCT ノードの酸化層厚さの変化を示す。被覆管温度が 1850°F より高い時は Baker-Just の式による計算が最も酸化層が厚くなるが、1850°F 以下の場合には川崎の式 (EM) 及び池田の式の方が Baker-Just の式よりも酸化層が厚くなり、1600°F 以下の場合には、Baker-Just の式による結果が最も酸化層厚さが薄い。これは Baker-Just の式が高温領域で酸化を大目に見積るように作られていることからして当然の結果である。Fig. 3.4.5 には破裂ノードの内外面の酸化厚さを示した。

3.4.2 TOODEE 2 のその他の改良・修正

その他に改良・修正点は以下の点である。

- (1) 被覆管破裂後の逆流蒸気流の流量減衰のための改良
- (2) 燃料棒プレナム温度の取扱いについての改良
- (3) 無限ループの修正

- (4) 実変数の比較方法の修正
- (5) 水蒸気の分子量のエラー修正

これらについては既に TOODEE 2/SUS のレポート²⁶⁾の中に記述されているのでそれを参照されたい。

Table 3.4.1-(1) List of Modified and Added Statements in TOODEE2 for Introducing Various Equations of Zr-Water Reaction Rate

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
		C*****	IN100010
1		SUBROUTINE INITEM	IN100020
		C-----	IN100030
		DESCRIPTION OF THE PROGRAM	IN100040
		C-----	IN100050
		C THIS SUBROUTINE READS AN INITIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AND	IN100060
		C ASSIGNS THE PERMANENT COOLANT TEMPERATURES. WHEN MORE THAN ONE	IN100070
		C TEMPERATURE IS ASSIGNED TO THE SAME POINT, THE LAST ASSIGNED	IN100080
		C VALUE IS USED. WHEN NO TEMPERATURE IS ASSIGNED TO A POINT, AN	IN100090
		C ERROR STOP RESULTS.	IN100100
		C VARIOUS PROGRAM OPTIONS AND INITIAL ZIRC OXIDE THICKNESSES ARE	IN100110
		C READ IN	IN100120
		C THIS SUBROUTINE ALSO READS THE POWER DISTRIBUTION DATA AND	IN100130
		C VARIOUS CONSTANTS.	IN100140
		C-----	IN100150
		C*****	IN100580
9		EQUIVALECE (AVAIL(2),PB) ,(AVAIL(3),PO,DEN),(AVAIL(4),PNT),	IN100590
	1	(AVAIL(16),TEND),(AVAIL(20),TMAX),	IN100600
	2	(AVAIL(21),EPS),(IPCW(1,1),TP(1,1),U(1,1),(AXPOW(1),STR(1,1)),	IN100610
	3	(VOL(1,1),RCP(1,1)),	IN100620
	3	(RAPOW(1),STA(1,2)),(AVAIL(70),IZRO2),(AVAIL(73),IHEAT)	IN100630
10		DIMENSION EQNAME(5,3)	IN100631
11		DATA EQNAME /'KAWA','SAKI','EV','EM','ED' /	IN100632
	1	'KAWA','SAKI','EM','EM' /	IN100633
	2	'I'ED','A EW','D'E' /	IN100634
		C-----	IN100640
370		WRITE (6,1006) J1,J2	IN107360
371		WRITE (6,930) IXT,JYT,TMAX	IN107370
372		TMAX=TMAX+459.7	IN107380
373		WRITE (6,932) TSA,FIL	IN107390
374		IF (ABS(AVAIL(70)).LT.1.0E-3) IZRO2 = 0	IN107391
375		IF (AVAIL(70).GT. .999.AND.AVAIL(70).LT.1.001) IZRO2 = 1	IN107392
376		IF (AVAIL(70).GT.1.999.AND.AVAIL(70).LT.2.001) IZRO2 = 2	IN107393
377		IF (AVAIL(70).GT.2.999.AND.AVAIL(70).LT.3.001) IZRO2 = 3	IN107394
378		IF (AVAIL(70).GT.3.999.AND.AVAIL(70).LT.4.001) IZRO2 = 4	IN107395
379		IF (ABS(AVAIL(73)).LT.1.0E-3) IHEAT = 0	IN107396
380		IF (AVAIL(73).GT. .999.AND.AVAIL(73).LT.1.001) IHEAT = 1	IN107397
381		IF (IZRO2.NE.0.AND. IZRO2.NE.4) WRITE (6,701) (EQNAME(L,IZRO2),L=1,5)	IN107398
382		IF (IZRO2.EQ.4) WRITE (6,702) AVAIL(71),AVAIL(72)	IN107399
383		IF (IHEAT.EQ.1) WRITE (6,703) AVAIL(74)	IN107400
384	701	FORMAT(9X,' ZR OXIDE THICKNESS WILL BE CALCULATED BY ',5A)	IN107401
385	702	FORMAT(9X,' ZR OXIDE THICKNESS WILL BE CALCULATED BY ',	IN107402
	1	'NEXT EQUATION',9X,'K = ',F10.7,' * EXP(-',F6.1,'/)',	IN107403
386	703	FORMAT(1H ,9A,' ZR-O2 REACTION HEAT RATE IS ',F10.1,' (BTU/FT3)')	IN107404
387		N=0	IN107405
388		IMI=1	IN107410

Table 3.4.1-(2)

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
1		SUBROUTINE ZRWAT	Z*100010
	C	.....	Z*100020
	C	DESCRIPTION OF THE PROGRAM.....	Z*100030
	C	.....	Z*100040
	C	THIS SUBROUTINE CALCULATES THE AMOUNT OF ZIRCONIUM - STEAM	Z*100050
	C	REACTION ACCORDING TO THE KINETICS OF BAKER-JUST. THE HEAT IS	Z*100060
	C	APPLIED AS A HEAT FLUX APPLIED TO THE NEXT-TO-LAST GRID LINE	Z*100070
	C	.....	Z*100080
	C	.....	Z*100090
9		DIMENSION DXR1(18) ,DXR2(18)	Z*100560
	1	DXP3(8) ,DXR4(8)	Z*100570
10		EQUIVALENCE (AVAIL(70),IZR02),(AVAIL(73),HEAT)	Z*100571
11		REAL K1(5),K2(5),H(2)	Z*100572
12		DATA (K1(I),I=1,4) / 3.054 , .3488 , .4530 , .1651 /	Z*100573
13		DATA (K2(I),I=1,4) / 4.1218E4, 3.0079E4, 3.0079E4, 3.3600E4 /	Z*100574
14		DATA H (1) / 1.13092E6 / , LLL / 0 /	Z*100575
15		IF (LLL,NE,0) GO TO 40	Z*100781
16		I = IZR02 + 1	Z*100782
17		II = HEAT + 1	Z*100783
18		K1(5)=AVAIL(71)	Z*100784
19		K2(5)=AVAIL(72)	Z*100785
20		H(2)=AVAIL(74)	Z*100786
21		LLL = 1	Z*100787
22	40	DO 36 J=2,JM	Z*100790
23		DXR15=DSQRT(XR1(J)**2+2.*K1(1)*DT/DEAP(K2(1)/TES(J)))-XR1(J)	Z*100800
24		CT=RA(IM)+DELRA(IM,J)-RA(IM2)-DELRA(IM2,J)	Z*100810
25		X1=XR1(J)	Z*100820
26		X2=XR2(J)	Z*100830
27		XT=X1+X2+DXR15	Z*100840
28		IF (XT,GT,CT) DXR15= CT-X1-X2	Z*100850
29		DXR1(J) =DXR15	Z*100860
30	36	XR1(J)=DXR1(J)+XR1(J)	Z*100870
31		HFM1(J)=H(1)*DXR1(J)/DT/2.	Z*100880
32	38	CONTINUE	Z*100890
33		IF (IRUP,EQ,0) RETURN	Z*100900
34		DO 39 J=2,JM	Z*100910
35		IF (J,NE,JS) GO TO 39	Z*100920
36		DXR25=DSQRT(XR2(J)**2+2.*K1(1)*DT/DEAP(K2(1)/TES(J)))-XR2(J)	Z*100930
37		X1=XR1(J)	Z*100940
38		X2=XR2(J)	Z*100950
39		CT=RA(IM)+DELRA(IM,J)-RA(IM2)-DELRA(IM2,J)	Z*100960
40		XT=X1+X2+DXR25	Z*100970
41		IF (XT,GT,CT) DXR25= CT-X1-X2	Z*100980
42		DXR2(J)=DXR25	Z*100990
43		XR2(J)= DXR2(J)+XR2(J)	Z*101000
44		HFM1(J)=H(1)*DXR1(J)/DT/2.+HFM1(J)	Z*101010
45	39	CONTINUE	Z*101020
46		RETURN	Z*101030
	C	.....	Z*101040
47		END	Z*101050

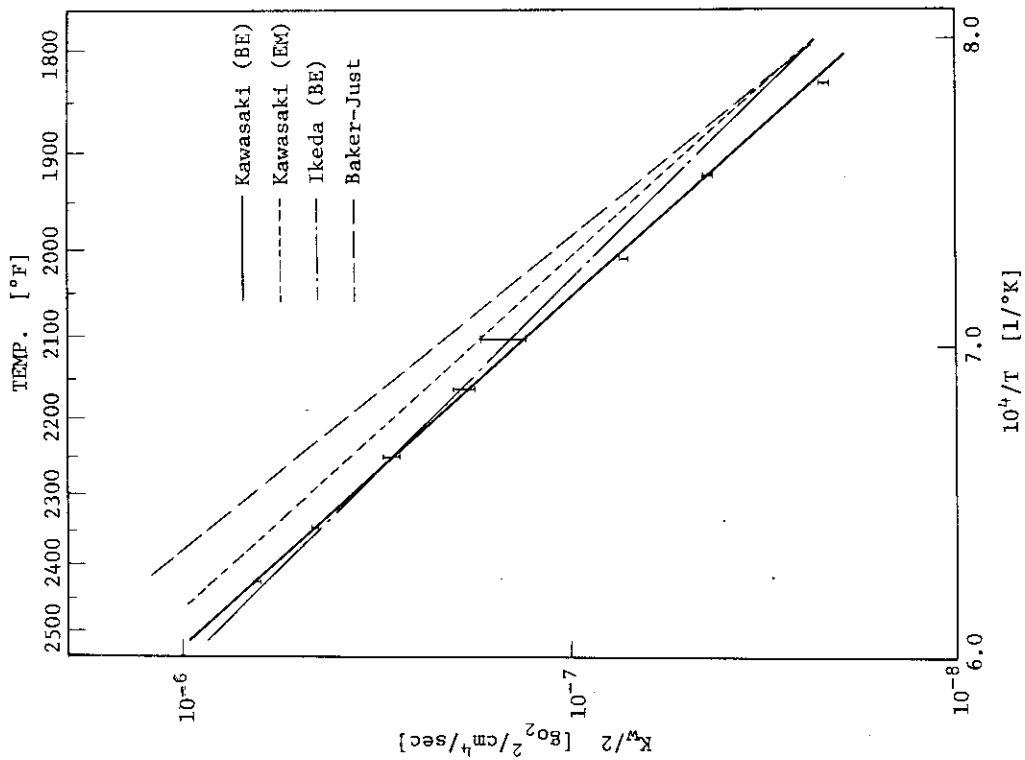


Fig. 3.4.1 Weight Gain in Zr-Water Reaction Estimated by Various Equations

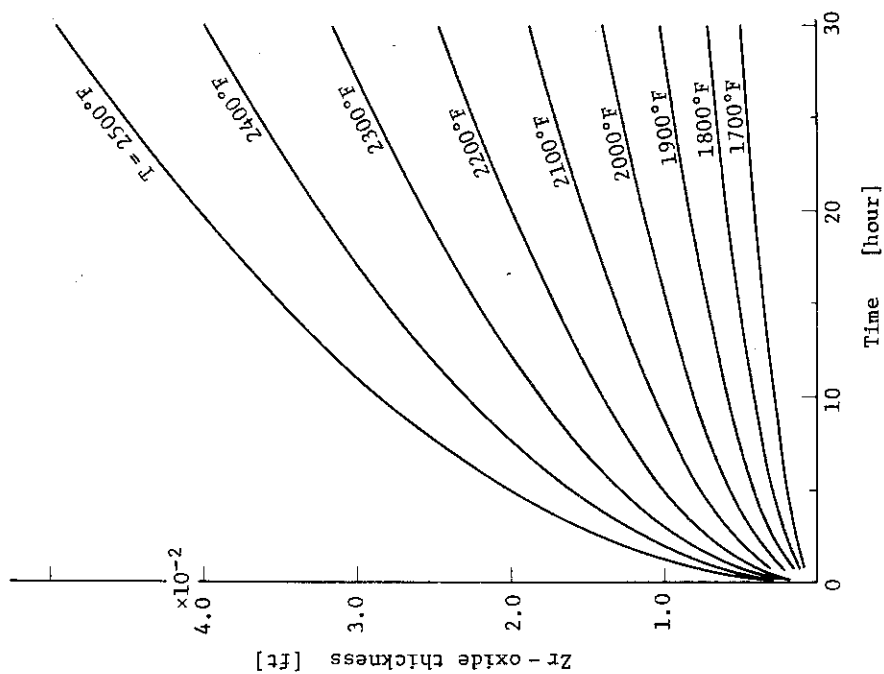


Fig. 3.4.2 Oxide Thickness as a Function of Heating Time

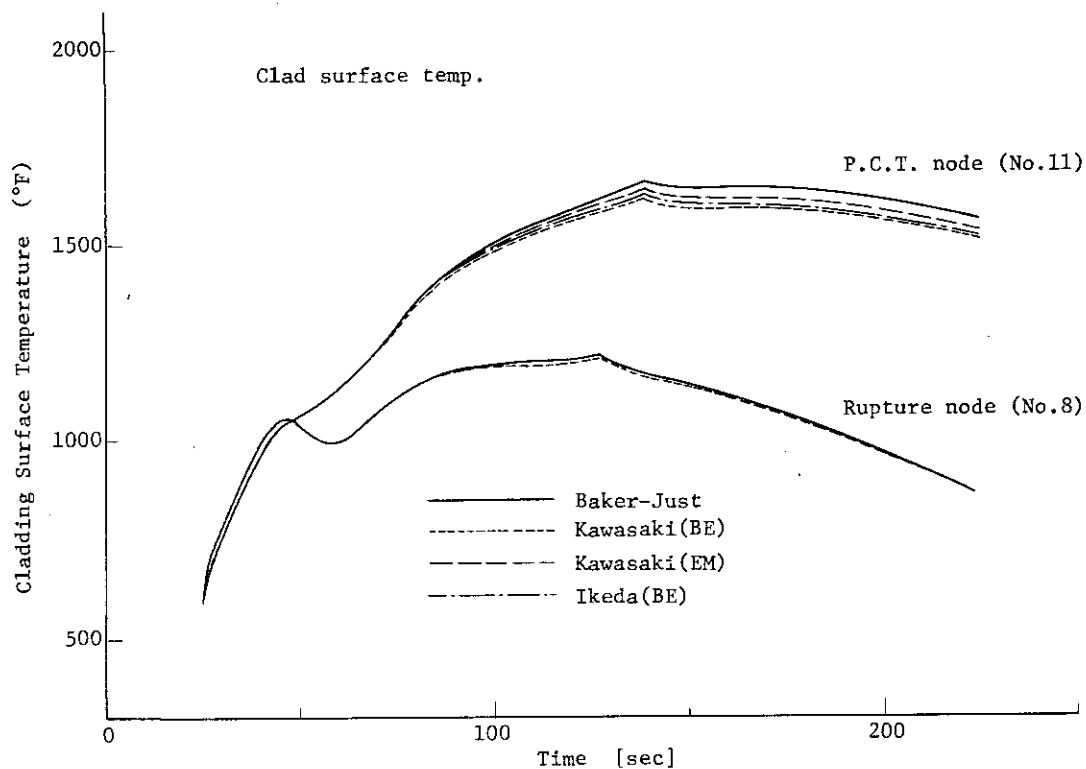


Fig. 3.4.3 Cladding Surface Temperatures Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction

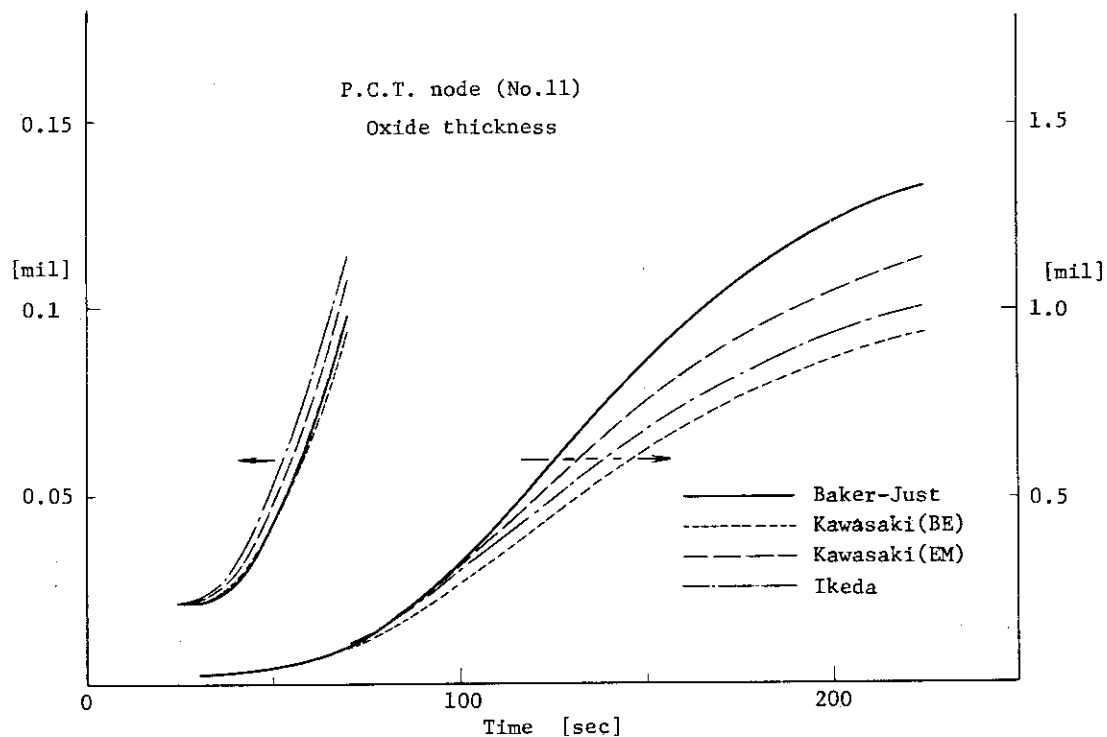


Fig. 3.4.4 Cladding Oxide Thickness at PCT Node Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction

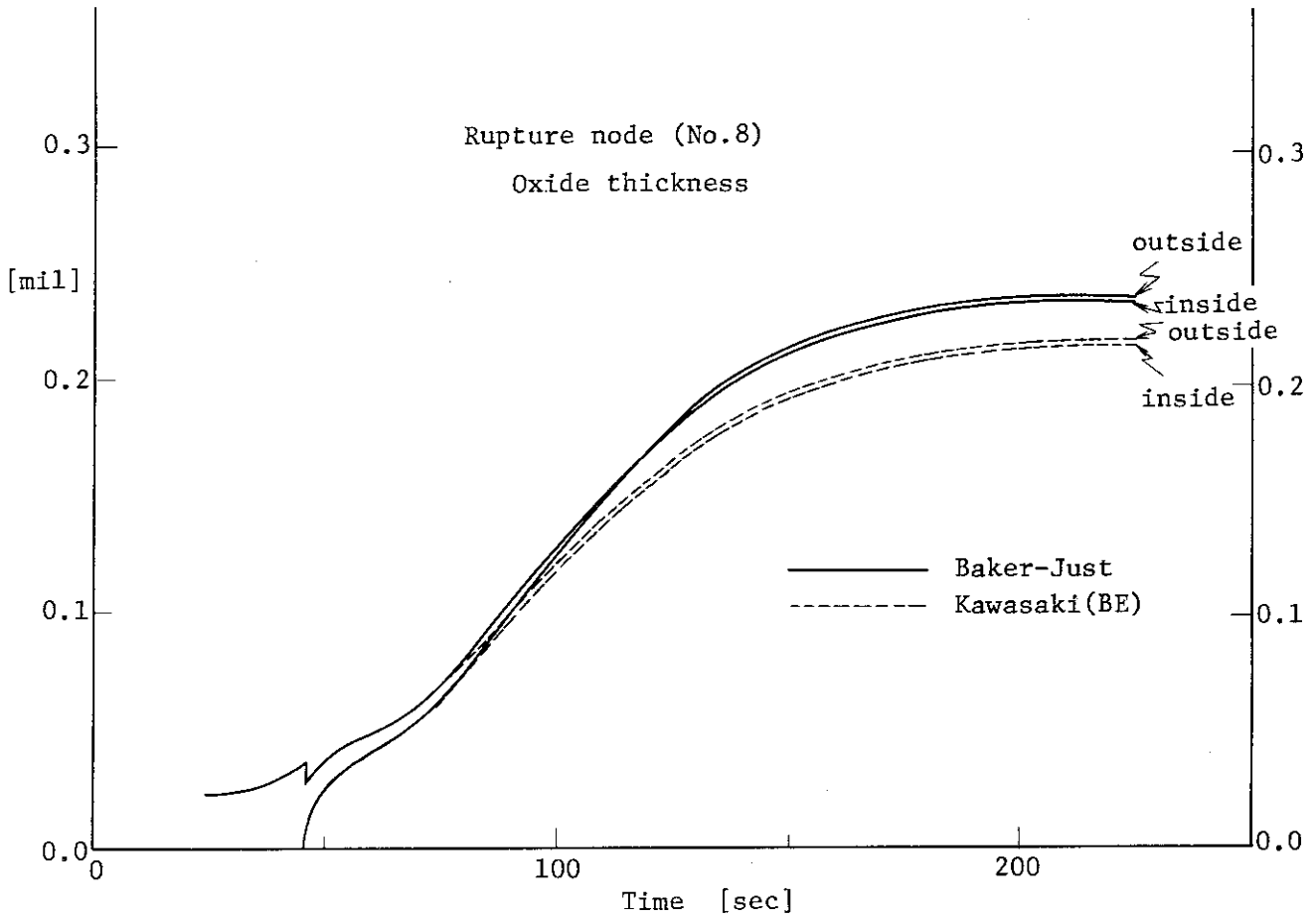


Fig. 3.4.5 Cladding Oxide Thickness at Ruptured Node Calculated with Various Equations for Zr-Water Reaction

3.5 MOXYおよびMOXY-PLOTの改良・修正

3.5.1 MOXYのプロッタ・ルーチンの改良

1) 症状

MOXY/MOD 32 Base Case の計算結果の報告書作成中に、輻射熱伝達率のプロッター図が、プリント出力されている値と大幅に異なることが発見された。

そこで、MOXY-PLOTコードで出力されるすべてのプロッター図を調べたところ

- ① 輻射熱伝達率
- ② 対流熱伝達率
- ③ 金属・水反応熱発生率

が、MOXY/MOD 32 のプリント出力と大きく異なることがわかった。

2) 診断

原因の可能性として考えられることとして

- i) 他の燃料棒の値をプロットしている。
- ii) 全く別の値をプロットしている。
- iii) そのエラーはMOXY/MOD 32にある。
- iv) そのエラーはMOXY-PLOTにある。

などが考えられた。またこの診断中に、WREMコードのMOXY/MOD 30で計算したBase Caseでも同様の症状があることがわかった。今回発見されるまで、全く気付かなかったものである。

1)の可能性を確かめるために、他の燃料棒のプロッター図とプリント出力の値を比較したところ、

「この症状がでていいるのは、対角線の燃料棒のみである。」

ことがわかった。また、さらに

「プロッター図から読みとった値は、プリント出力の値の約 $1/2$ になっている。」

ことがわかった。

そこで、MOXY本体のプログラムの調査を行った結果、原因として次のことが判明した。なお以下の内容は、MOD 32、MOD 30ともに共通である。

プリント出力を書くサブルーチンOUTPUTでは、1.1で示した①、②、③の計算値を書き出すときに、対角線上の燃料棒に対しては計算値を2倍して書いている。しかし、プロッター用のデータを書いているFTMAINの中では、計算値そのものをテープ(又はディスク)に書いている。そして、MOXY-PLOTコードでは、テープ(又はディスク)に書かれた値そのものをプロットしている。

これについては、プリント出力のための処置が正しい。すなわち、上に述べたように、対角線によって分割されたバンドルの半分を計算上考える時、対角線上の燃料棒については、対角線に分けられた片側 $1/2$ に対して計算しているからである。したがって、温度、半径、酸化層厚さ等はそのままの値でよいが、集合体全体として考えた場合、発生熱などに関しては、計算値の2倍の値がその燃料棒の値となるべきである。

この調査の際に、金属 - 水反応熱発生率について、次のことがわかった。

MOXYコードでは、プロッタ用のデータとして、外側、内側別々に金属・水反応熱発生率を書いているが、プロッタ図にでてくる金属・水反応熱発生率は外側についてのみである。そして内側のそれをプロットする入力オプションはMOXY-PLOTに用意されていない。

金属・水反応の情報として、酸化層厚さについては、内側、外側それぞれのプロット図がある方が便利であるが、反応熱発生率については、内側、外側合計の値すなわち、その燃料棒における反応熱発生率がプロット図として表わされた方が現象を見る上で便利と思われる。

また、MOXY-PLOTコードで金属・水反応熱発生率として、1つの入力を与えられるということからも、作者は内側、外側の合計の値をプロットしようとしたものと思われる。

3) 処 置

プロッター用のデータは、FTMAINの中で、サブルーチンDWRTを呼び、DWRTの中で実際に書いている。ただし、そのデータにDWRTを呼び、DWRTの中では1つの変数 (vector) で書いているので、このDWRTの中で対角線上の値を2倍することはできない。また、FTMAINの中で、これを行うには、2倍するものについてもう1つずつ、配列をもった変数をつくる必要がある。

そこで、2倍する必要があるデータをテープ (又はディスク) に書くためのサブルーチンDWRT2をつくった。その中で、対角線上のものは2倍し、その他のものは、そのままの値を書くことにした。したがって、2倍する必要があるデータを書くときには、今までDWRTを呼んでいたのをDWRT2を呼ぶことになった。

ここで、対角線上であるか否かを判断するための変数MIRRMが必要なので、これはFTMAINとDWRT2とにCOMMON文をつくり、データを渡した。

次に、金属・水反応熱発生率については上記と同様であるが、内・外面合計の値をプロットするために、これまで、外面のreaction heat rateとしてプロッター用のデータとしていた値QMWRを

$$QMWTOT = QMWR + QMWI$$

として内外面合計の値QMWTOTに変更した。MOXY-PLOTでは、このMWRの値をプロットしていたので、上記のような変更を行ったことによって、金属・水反応熱発生率のプロッタ図は、これまでの入力方法のままで、内・外面合計の値が表わされることになる。

以上の修正・変更点について関係するソースリストを本節の最後に載せておく。

4) MOXY-PLOTの改良

前記1部で述べた作業を行った際に、MOXY-PLOTで使用されているサブルーチンの中にRELAP4コードで使用されているものよりも古いバージョンのものがあり、グラフィックディスプレイを使用するのに不都合な点が出たため、これらを新しいバージョンのものと入れ換える作業を行った。

これは、プロッタやCOMの場合は障害はないが、グラフィックディスプレイを使用して出力した場合、図の縦軸のスカラーの数字と題名が書けなかったことによる。また、この入れ換を行った際に、図のヘッダーとタイトルについてのみは、以前のサブルーチンを使用した方が見やすいので、そちらを使用することにした。

3.5.2 MOXY/MOD 32中のサブルーチンの修正

MOXY/MOD 32のBase Case計算中に生じたエラーを解決するために、プログラムを以下のように修正した。

1. Error

サブルーチン,FIJ, STRINGの中で, DSQRTの中が負になった。

($-1.8 \dots \times 10^{-18}$)

2. 検討

これは、ビューファクターを計算するところであり、このときは、DSQRTの中はゼロになるべきところであった。

負の値といっても、ゼロとみなすことのできる小さい値であり、これは計算による虫と考えられる。

3. 修正

プログラム上でDSQRT(X-Y)とされていることから考えても $X \geq Y$ なる関係が必ず成立するので、X-Yの値が無視できない程の負の値をもつことはないと思われる。したがって、これを、

$$\text{DSQRT}(\text{DABS}(X-Y))$$

と修正することによって、この問題を解決することにした。すなわち、DSQRTの値は正に出るが、これもゼロとみなすことのできる程度の値であり、計算結果に影響を及ぼすものではないと判断したわけである。

4. 追記

今回のエラーは、計算機の差によって生じる可能性のあるエラーであろう。また、ビューファクターの再計算、しかも3本目の被覆管の破裂のところで生じており、導入したときのサンプル問題がたまたま破裂を生じないケースであったために、変換作業時には発見されなかったと考えられる。

Table 3.5.1-(1) List of Modified Statements in MOXY(MOD32)

ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM	SEQUENCE
		ACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT0,CP) SOURCE PROGRAM LIST -780322-(V02,L12) DATE 78.1	
		MOXY/MOD032*02/01/77*ORE	MAIN0010
1		IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)	MAIN0020
2		DIMENSION F1(37,37),W(37),CONV(37),HODO(37),	MAIN0030
	1	BS1(37),RHT1(37),HSTO(37),DRP(37),DRP1(37),@MWR(37),SORDK(80),	MAIN0040
	2	DKTIM(80),HZ1(57),TZ1(57),TS1NK(57),TME(57),TITL(20)	MAIN0050
3		DIMENSION HZ2(57),TZ2(57),HZ3(57),TZ3(57),HZ4(57),TZ4(57)	MAIN0060
4		DIMENSION NRI(37),NDR(37,3),DR(37,3),REGSZE(37,3),@A(37,6),	MAIN0070
	1	@Z(37,6),@B(37,6),FLUX(37),TAVG(37),T(37,25),TK(25),C(25),	MAIN0080
	2	NI(37,3),VRI(37,3),NSI(37),A(37,25),S(37,25),V(37,25),B(25),	MAIN0090
	3	D(25),A1(37,25),T1(37,25),@E(6),E(25)	MAIN0100
5		DIMENSION EXR(37),R2(37),CT(37),MIRRM(8,37),@MWI(37),FLXI(37)	MAIN0110
6		DIMENSION BB(37,1),IROW(37),JCOL(37),SCALFC(37),HZ5(57),TZ5(57)	MAIN0120
7		DIMENSION F(65,65),RO(65),AEA(65),AREA(65),TA(65,35),TOD(4)	MAIN0130
8		DIMENSION DRP1(37),DRP2(37),GAPCON(37),GAPC2(37),INDOLD(7)	MAIN0140
9		DIMENSION DT1(10),TDT(10),NOUTP(10),TOUT(10),SO(30),TB(30)	MAIN0150
10		DIMENSION Z(5251),TZ(2,1),HEADR(15),TITL(1),INTGR(250),LGCAL(50)	MAIN0160
11		DIMENSION Y(1500)	MAIN0170
12		DIMENSION R1(37),R5(37),CLDGAP(37),SWELL(37),RUPTUR(37)	MAIN0180
13		DIMENSION @MWTOT(37)	MAIN0185
		COMMON/MMM/MIRRM	MAIN0190
14		REAL TITLE,TOD,TRLR	MAIN0210
15		REAL EMFLAG,XMOD	MAIN0220
16		INTEGER SWT,HTSCE,ALTHRU,RECOMP,STFLO	MAIN0230
17		INTEGER RODTYP(37),ARYTYP	MAIN0240
18		REAL*8 MSTA,MOLEFR(6,36),MWT(7)	MAIN0250
19		REAL*8 MFN(3)	MAIN0260
20		LOGICAL ISCAN@,SWELL,SPRAY,RODI,ISROD@,IGAPCL	MAIN0270
21		LOGICAL LGCAL,EM,ERR,EOSWLR,EMFLG,SKIP,THETA,GAPCAL,ABRV,RUPTUR	MAIN0280
22		EQUIVALENCE (LGCAL(7),IGAPCL),(INTGR(18),I@UEN)	MAIN0310
23		EQUIVALENCE (Z(1),TZ(1)),(TITL(1),TITL(1)),(Z(1),Y(501))	MAIN0320
24		EQUIVALENCE (Z(1001),DT1(1)),(Z(1011),TDT(1)),(Z(1021),TOUT(1))	MAIN0330
25		EQUIVALENCE (Z(1031),T(1)),(Z(2031),REGSZE(1)),(Z(2501),SORDK(1))	MAIN0340
26			

Table 3.5.1-(2)

390		DO 8150 J=1,NREG	MAIN4640
391		@Z(I,J)=@A(I,J)	MAIN4650
		C***** UPDATE DRP	MAIN4660
		C	MAIN4670
392		IF (IMWR,EQ,0) GO TO 7250	MAIN4680
393		DO 8000 I=1,N	MAIN4690
394		DRP1(I)=DRP2(I)	MAIN4700
395		8000 DRP(I) = DRP1(I)	MAIN4710
396		7250 IF (N7,GE,LTS,OR,ALTHRU,EQ,2) CALL OUTPUT(RHT1,CONV,@MWR,HSTO,DRP,MAIN4720	
	1	T,TAVG,TT,DT,TITLE,IMWR,NTS,NCONV,RECOMP,N7,SWT,N,NN,LJNPG,TCON,MAIN4730	
	2	TA,DRP1,GAPCON,RATIO,@A,MFN,RDATE,MIRRM,NF,NSYM,ABRV,NI,NLIM,MAIN4740	
	3	RO,@MWI,TOD,NA)	MAIN4750
397		IF (SWT,EQ,2) GO TO 9000	MAIN4760
398		SWT=2	MAIN4770
399		WRITE(7) N,NN,NREG,((N1(I,J),J=1,NREG),I=1,N),TITLE,MFN,RDATE,TOD,MAIN4780	
400		CALL DWRT1(TT,RATIO,TST,TST)	MAIN4790
401		DO 9100 I=1,NN	MAIN4800
402		CALL DWRT(T(I),N)	MAIN4810
403		9100 CONTINUE	MAIN4820
404		CALL DWRT(HODO,N)	MAIN4830
405		CALL DWRT(FLUX,N)	MAIN4840
406		CALL DWRT2(RHT1,N)	MAIN4850
407		CALL DWRT2(CONV,N)	MAIN4860
408		DO 9999 I=1,N	MAIN4870
409		@MWTOT(I)=@MWR(I)+@MWI(I)	MAIN4875
410		9999 CONTINUE	MAIN4880
411		CALL DWRT2(@MWTOT,N)	MAIN4885
412		CALL DWRT(GAPCON,N)	MAIN4890
413		CALL DWRT(DRP,N)	MAIN4900
414		CALL DWRT(DRP1,N)	MAIN4910
415		CALL DWRT(RO,N)	MAIN4920
416		CALL DWRT(CT,N)	MAIN4930
417		CALL DWRT(FLXI,N)	MAIN4940
418		CALL DWRT2(@MWI,N)	MAIN4950
419		IF (ALTHRU,EQ,1) GO TO 30	MAIN4960
420		WRITE(7) TRLR,TRLR,TRLR,TRLR	MAIN4970
421		GO TO 15	MAIN4980
		C	MAIN4990
		C***** COMPUTE INITIAL STEADY-STATE CONDITIONS	MAIN5000
		C	MAIN5010
422		DO 450 I=1,NP	MAIN5020
423		NPIN=I	MAIN5030
424		CALL TEMZ(NRI,NDR,NI,NSI,DR,VRI,A,S,V,B,D,@A,HODO,FLUX,TK,MAIN5040	
	1	C,T,TAVG,P1,TST,TEP,N,NA,RHOF, NPIN,ITM,NN,ICON,FCON,STPR,MAIN5050	
	1	SIGMA,E1,E2,R1,R2,CONCON,TJUMP,PGAS,GAPCON,MOLEFR,IGAPCL,RODTYP,MAIN5060	
	2	RUFF,HUFCL,CT,TAVG,TCLAVG,CLDGAP,POROS,MWT,SWELL,RUPTUR)MAIN5070	
425		450 CONTINUE	MAIN5080

Table 3.5.1-(3)

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT0,CP)				SOURCE PROGRAM LIST -780322-(V02,L12)		DATE
ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM		SEQUENCE		
	C*****	DWRT2 11/14/78 K, MATSUMOTO/JAERI		DW200010		
1		SUBROUTINE DWRT2(A,N)		DW200020		
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)		DW200030		
3	C	WRITES DOUBLE-PRECISION VECTORS IN SINGLE PRECISION		DW200040		
4		DIMENSION A(1),MIRRM(8,37)		DW200050		
5		COMMON/MMM/MIRRM		DW200060		
6		REAL B(37),XM		DW200070		
7		DO 100 I=1,N		DW200080		
8		XM=1.		DW200090		
9		IF(MIRRM(2,I).EQ.0) XM=2.		DW200100		
10		B(I)=A(I)		DW200110		
11		B(I)=B(I)*XM		DW200120		
12	100	CONTINUE		DW200130		
13		WRITE(7) (B(I),I=1,N)		DW200140		
14		RETURN		DW200150		
15		END		DW200160		

Table 3.5.1-(4)

FACOM 230-75 M7 FORTRAN-IV H COMPILER (OPT0,CP)				SOURCE PROGRAM LIST -780322-(V02,L12)		DATE
ISN	ST-NO	SOURCE PROGRAM		SEQUENCE		
	C*****	DWRT 06/14/74 D.R.EVANS		DWRT0000		
1		SUBROUTINE DWRT(A,N)		DWRT0010		
2		IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)		DWRT0020		
3	C	WRITES DOUBLE-PRECISION VECTORS IN SINGLE PRECISION		DWRT0030		
4	C	ON IBM		DWRT0040		
5		DIMENSION A(1)		DWRT0050		
6		REAL B(37)		DWRT0060		
7		DO 100 I=1,N		DWRT0070		
8		B(I)=A(I)		DWRT0080		
9	100	CONTINUE		DWRT0090		
10		WRITE(7) (B(I),I=1,N)		DWRT0100		
		RETURN		DWRT0120		
		END		DWRT0130		

Appendix A PWR再浸水・再冠水期間の炉出力計算手法

PWRの大破断LOCAを解析する場合、ブローダウン中の炉出力はRELAP 4-EMコードで冷却材密度変化による反応度フィードバック等を考慮して一点近似のkineticsを解いて得られる。再浸水・再冠水期間中では炉出力に対する核分裂エネルギーの寄与は小さいけれども無視し得るほどではない。そのためブローダウン中の計算と矛盾なくこの期間の炉出力を計算してRELAP 4-FLOODによるシステム再冠水計算、TOODEE 2（又はTOBUNRAD）による燃料棒ヒートアップ計算の入力データとする必要がある。

RELAP 4-EMでは冷却材密度変化、燃料温度変化に起因するフィードバック反応度を計算して炉心動特性を解く他に、反応度の時間変化を入力して炉心動特性を解くこともできる。その機能を活用して再浸水・再冠水期間の炉出力計算を行うこととする。

同じ手法は既にRef. 36)において使用されている。

使用するモデルはFig. A 1に示すように1-ボリューム、2-ジャンクション、1-炉心ヒート・スラブからなりたっている。入力データ・リストをTable A 1に示す。解析のつど変えるべき入力データは、炉心動特性定数（card 140000）と総反応度の時間依存のデータ（card 14100Y）のみであり、物理的に意味があるのもこれらだけである。この総反応度の時間依存のデータは、バイパス終了まではブローダウン計算の結果を、それ以降は外挿した値を使用する。

Fig. A 2にブローダウン計算より得られた反応度の時間変化と、それから作成した炉出力計算のための入力値を示す。Fig. A 3にはこの入力データにもとづいて計算された計算結果を示す。

Appendix B PWR再浸水期間中のECCS流量計算手法

RELAP 4-EMを用いてブローダウン計算をバイパス終了時刻EOBPを超えて（即ち再浸水計算を）行って、ECC水を注入し続けると均質モデルのために圧力が非物理的なほど低下する。即ち格納容器圧力は30 psia程度あるにもかかわらず一次系は数psiaにまで下がる。

又この計算によって得られるBOCREC時の圧力容器内の状態とくにダウンカマーの状態は非物理的なものである。そのため現在の解析手法では再冠水計算のRELAP 4-FLOODのBOCREC時の初期条件として、燃料棒温度はTOODEE 2の断熱計算によって得られた値、又SG 2次側条件は、EOBP条件を使用している。従ってブローダウン計算を、EOBPを超えて計算する必要があるとすればECCS流量を得るためのみである。しかしながらこの期間のこの種の計算によって得られる圧力は上述のように非現実的であり、かつ長い計算時間を要するCEOBPまでの2～3倍）。従ってEOBP以降のECC流量について簡便な方法で、より物理的な結果を得ることが望ましい。

ここではRELAP 4のTime Dependent Volume Conditionの機能を活用した手法を述べる。この手法はRef. 37)の示唆に基づいたものである。

使用するモデルはFig. B1に示すように3-ボリューム、4-ジャンクションから成り立っている。ノード#①は健全ループの蓄圧器を示すもので健全ループがN個あればそれを1つで模擬する。ノード#②は蓄圧器とコールド・レグを結ぶ配管を表わしている。ノード#③はコールドレクを表わすリザーバーであり、このノードに対してtime dependent volume conditionを使用する。ジャンクションJ 3, J 4はそれぞれ低圧注入系(LPIS), 高圧注入系(HPIS)を

表わす。Time dependent volume condition のうち、この場合物理的に意味のある量は圧力のみであり、それはEOBPまではブローダウン計算によって得られるコールドレグ圧力を、EOBP以降はCONTEMPT-LT (EM)によって計算される格納容器圧力を入力する。Table B 1 に入力データリストを示す。Fig. B 2 にこの入力データによるAC (蓄圧器)からの流量計算結果を示す。

Fig. B 3 に他の入力データを用いて計算された3ケースについて計算結果を比較してある。ケース1はブローダウン計算におけるAC流量、ケース2は、3ボリューム問題でEOBP以降もブローダウン計算によるコールドレグ圧力をtime dependent volume conditionとしたもの、ケース3はEOBP以降は格納容器圧力をtime dependent volume conditionとしたものである。図から明らかなようにケース1とケース2はほとんど同じと見てよいほどよく一致しており、この手法の正当性を示している。ケース2とケース3ではリザーバー圧力がケース3の方が高くなるのでEOBP以降の流量はケース3の方が小さくなり、ACが空になる時刻においてもケース3が1秒遅くなる。そのためBOCRECはケース3の方が若干遅くなりより保守的な結果を与え、かつケース2よりは現実に近いと考えられるのでケース3のような入力データを使用することが妥当と考えられる。

Appendix C RELAP 4によるブローダウン計算についてのノート

(1) スタグネーション・プロパティ・オプション

RELAP 4/MOD 5, MOD 6においては臨界流を計算するさいの変数である圧力、エンタルピーをそれまでのスタディック・プロパティを使用する方法に加えて、スタグネーションプロパティを使用するオプションが追加された。このオプションを使用するためにはISTAGP=(on Card 082000)とすればよい。しかしながら我々の検討の結果このオプションを採用することは不適當であると結論されたので使用しない。

(2) EMオプションの取り方について

RELAP 4/MOD 3まではISPROG=1 (on Card 010001)をとることでEMの経路を取るようになっていたが、MOD 5, MOD 6ではISPROG=1とするとISTAGP=1としなければならない。そのためISPROG=0としてIIPROG=IEMHT=IEMPS=IEMEC=1 (on Card 010003)とすることで同様の機能を持たせる。

(3) 熱伝達計算ロジックの取り方

RELAP 4/MOD 6でEM熱伝達ロジックを採用するためには、NSUR=-1 (on Card 150000)としなければならない。

Appendix D RELAP 4 - FLOODによる再冠水解析の入力データ作成法

RELAP 4-FLOODコードによる再冠水計算はBOCRECを起点として、つまり過渡状態の途中から開始するので、入力データ作成上は先ずBOCREC時刻の決定が必要である。次にそのBOCREC時刻に基づいて、他の計算系列(ブローダウン解析、格納容器内圧解析、燃料棒温度解析)の結果からBOCRECにおけるプラントの状態に関するデータと、再冠水期間中の境界条件となる諸データ(格納容器内圧変化、崩壊熱曲線、注水率、等)を作成する。

(1) BOCREC 時刻の決定

ブローダウン解析またはそれに代る簡易計算 (Appendix B) による健全ループ側の ECC 注水率 (蓄圧注入系, 低圧注入系, 高圧注入系) を積分し, 健全側コールドレグ及び下部プレナムを満水にするまでの時間を求める。その際, ECC 水がダウンカマ部を自由落下する時間も考慮する。例えば, ブローダウン解析によるバイパス終了時刻が t_{EOB} , ECC 注水率の積分量がコールドレグと下部プレナムを満たすまでの時間を Δt_{LP} , ダウンカマ部自由落下時刻を Δt_{FF} とすれば, BOCREC 時刻 t_B は

$$t_B = t_{EOB} + \Delta t_{LP} + \Delta t_{FF}$$

として求まる。以上は単にマスバランスから決まる時刻であり, 場合によっては压力容器構造物によるダウンカマ部での蒸気発生による ECC の落下遅れや, 破断口へのはじき飛ばしの効果 (いわゆる Hot - Wall 効果) を考慮する必要も生じる。³⁸⁾ しかしながら最近の LOFT³⁹⁾ によれば, Hot - Wall 効果による ECC の落下遅れはかなり少ないことが報告されているので, 上に述べたような単純なマスバランスによる評価でも (根拠の怪しいモデルを追加することを考えるよりは) 問題ないと思われる。なおマスバランスで計算するさいの水の密度は, 予想される BOCREC 時刻での格納容器内圧下での, 適当な温度 (コールドレグに対しては ECC 水の温度, 下部プレナムに対しては構造材からの伝熱による昇温を考慮した温度) における値を用いる。

(2) BOCREC 時刻のプラント状態に関するデータ

RELAP 4 コードは必ず定常状態から計算が開始される ($t = 0$ は常に定常状態と見なして計算する)。したがって本来過渡変化の途中である BOCREC 時のプラント状態を, 例えばブローダウン解析を延長したものからデータを作って入力しても, 正しく計算が行われる訳ではない。そこで RELAP 4 - FLOOD の入力としては, BOCREC すなわち再冠水開始時には, 一次系の圧力は格納容器内圧と同一圧力でどこでも一定とし, 压力容器下部の炉心下端以下にのみ水がたまっているとす。一次系の圧力一定の仮定は, ループ部分の流動がほとんどなく停滞していると見なすことに対応するが, これは LOCA 時に実際に生じる現象から考えても, そう悪い仮定ではない。下部プレナムは水すなわち ECC で満たされているとするが, その水温は飽和温度よりやや低目の値を用いる。実際のプラントで予想される強サブクールの水温, すなわち ECC がダウンカマ壁面等で緩められる効果を考慮して求められた水温を下部プレナムに対して用いると, RELAP 4 の均質平衡モデル特有の凝縮効果の過大評価のために計算が破綻する。この実ベースの温度は後で述べる FLECHT 相関式のための入力にのみ用いる。

一次系の圧力一定の仮定に対応して, ジャンクションデータの流量は 0 とする。但し, ECCS を表わすフィルジャンクション (コールドレグではなくダウンカマに注水する) には BOCREC 時の注水率を初期流量として与える。

炉出力は RELAP 4 - POWER で計算された崩壊熱曲線により計算する。蒸気発生器 2 次側の状態はバイパス終了時のブローダウン計算結果を流用する。これはリフィル期間中は 2 次側の方が温度が高く, すでに 1 次側へのヒートソースとなっていると考えられるので, こうすることにより再冠水中のヒートソースの温度を高目に見積るためである。

ジャンクションの形状損失係数 (K - ファクター) はブローダウン解析のモデルとの整合性を図るため, 原則としてブローダウン解析 (RELAP 4 - EM) に用いられたものと同じ, すなわ

ち(入力値+residual coefficient)を用いる。もちろんボリューム分割が異なる所では、対応する修正を施さねばならない。

燃料被覆管表面温度はバイパス終了以後 TOODEE 2 によって平均燃料棒について計算された値を用いる。

(3) FLECHT 相関式のためのデータ

再冠水中の炉心燃料表面熱伝達係数の相関式及びキャリーオーバー率(炉心出口流量/炉心入口流量)に対する相関式の2つに対する入力値は以下のように作成する。

炉心入口サブクーリングの値は2)で触れた実ベースでの昇温を考慮したECC温度を基に入力する。線出力密度は平均燃料棒中央部に対する値を崩壊熱曲線に基づいて求め、1.05倍(FLECHTテスト集合体のピーキング)する。被覆管最高表面温度は前述のTOODEE 2計算によって求める。ブロッケージは通常考慮しない。

(4) 再冠水中の境界条件となる入力データ

再冠水期間中の炉出力変化はRELAP 4-POWERによる計算結果を用いる。ポンプデータに関して、ローター固着の状態を模擬したい場合には、特性曲線等のデータはブローダウン解析と同じものを使用し、回転数を極めて小さい値とする。または予め回転数0における流量とヘッドの関係から有効的なK-ファクターを計算してポンプ出入口のジャンクションに与える。

ECCSの注水率データは、1)で述べたようにブローダウン解析またはそれに代る簡易計算から求められた注水率を用いる。蓄圧注入系については、その作動終了時は実際のプラントでは背圧を加えているN₂ガスがループ部へ混入する時点、解析計算上は蓄圧器の水位が0になった時点である。そのため計算上では蓄圧器とコールドレグ間のライン及び健全側コールドレグに、蓄圧器からの水が残ったままである。そこでRELAP 4-FLOODの入力として注入率を考える際には、これらの残留水もダウンカマを通過して落下し炉心の冷却へ寄与すると考えて入力データ(フィルデータ)を作成する。例えば破断後t秒に蓄圧器が空になり計算上、注水率が0となったとする。その終了寸前の流量がW(kg/sec)とする。蓄圧器ライン及びコールドレグの残留水が合わせてM(kg)であったとすれば、再冠水解析上は蓄圧器からの注水が

$$\Delta t_B \text{ (sec)} = M \text{ (kg)} / W \text{ (kg/sec)}$$

だけ延長されているとして取扱う。実際にはコールドレグ内の残留水は蓄圧器以外からの寄与もあるので適当な補正が必要である。

最後になったが、再冠水の境界条件として最も重要な格納容器内圧の取扱いを説明する。再冠水期間中の格納容器内圧は、むしろ再冠水過程で破断口から放出される蒸気流の状態に依存するので、RELAP 4-FLOODとCONTEMPT-LT(EM)との2コードによる繰り返し計算が必要となる。第1近似としてまず再冠水期間中の蒸気放出なしとしてCONTEMPT-LT(EM)で計算された格納容器内圧変化をRELAP 4-FLOODの入力として使い、再冠水解析を行う。そこで得られた放出蒸気流量と放出エネルギー率を入力としてCONTEMPT-LT(EM)の計算を行う。以下同様の手順の繰り返しがあるが、格納容器内圧の変化は再冠水中の放出流量の差にそれ程敏感ではないので通常2~3回の繰り返しで大むね収束する。

Appendix E CONTEMPT-LT (EM)による格納容器内圧計算の入力データ作成法

CONTEMPT-LT (EM)コードによってPWR-LOCA 期間中の格納容器内圧計算を行うのはそれが再冠水期間中の一次系の挙動を解析するうえでの背圧として重要なためである。再冠水計算にとっては背圧が低い方がより保守的な結果を与えるので、評価解析としては再冠水期間中の格納容器圧力を低めに評価することが要求される。そのために米国 NRC が Branch Technical Position CSB 6-1 において定めている最小格納容器内圧モデル (MCPM)を採用してデータ作成と解析を行う。

(1) ヒートシンク幾何形状データ

格納容器内気相部に接している構造物はできる限りヒート・シンク構造物として採用する。ヒート・シンク構造物は大きく分けると格納容器壁そのものと格納容器内の構造物とに分けられる。格納容器壁はドーム部は半球形、胴部は円筒形であるが入力モデルでは内側表面積、厚さはそのままにして平板として扱った。格納容器下部は通常厚いコンクリートで覆われており、それらのコンクリートをヒート・シンクとして扱う。格納容器内構造物としての一次系は蓄圧器を除いて厚い石綿で被われているので断熱と考えられるので、蓄圧器のみをヒート・シンクとして考慮する。複数個の類似した構造物を一つの構造物で表現するときは総表面積と総体積が保存されるように表面積と厚さを入力する。

(2) 熱伝達係数

格納容器壁外面では自然対流伝達及び輻射熱伝達、格納容器壁内面および格納容器内構造物の表面では凝縮熱伝達を用いる。凝縮熱伝達係数の詳細は 3.3 節を参照されたい。

(3) 格納容器内に放出される質量とエネルギー

これに属するものはブローダウン期間および再冠水期間中に一次系から放出される水量とエネルギー、とスプレーによるものがある。

(a) ブローダウン期間の放出水量とエネルギー

この期間の入力データは放出質量流量と比エンタルピーである。放出の経路が複数個ある場合は放出質量流量は和を、比エンタルピーは平均値を用いる。

(b) 再冠水期間の放出水量とエネルギー

この期間の入力データは放出質量流量と放出エネルギー率である。再冠水期間中の一次系からの放出流としては ECC 水が炉心に至って発生して格納容器へ放出される蒸気と、ダウンカマからオーバーフローして格納容器内へ放出される液相水である。この液相水の格納容器内気相部圧力に対する直接的寄与は小さいのでこれを無視して、放出質量流量と放出エネルギー率は放出蒸気流のみを考慮に入れる。

(c) 格納容器スプレー

MCPMに従ってスプレー水は最低温度を仮定し、スプレー流量率は最大値とする。スプレー熱交換効率が 1.0、スプレーの方向は 100%気相部とする。

(4) 初期条件

MCPMに従い、定常運転時の格納容器内気相部温度及び外気温度を低くする。

Appendix F PWR-LOCA 解析のためのノード分割法の側

- (1) ブローダウン計算 (Fig. F 1)
- (2) 再冠水計算 (Fig. F 2)
- (3) ホット・チャンネル計算
 - ノード分割法 (Fig. F 3)
 - 燃料棒分割法 (Fig. F 4)
- (4) 燃料棒挙動解析計算
 - 燃料棒配列 (Fig. F 5)
 - 燃料棒軸方向分割法 (Fig. F 6)

Table A 1 Input Data for Power Calculation during Refill-Reflood Period

```

= POWER CURVE CALCULATION DURING REFILL-REFLOOD PERIOD (MOC6)
*
010001 -2 2 3 2 1 0 0 2 0 0 0 2 1 1 1 1 0 0
*
010002 1.E-6 1.
*
020000 TR 0 NQ 0
*
030010 1 1000 1000 1 .01 0. 10.
030020 10 1000 1000 1 .1 0. 50.
030030 10 1000 1000 1 1. 0. 1000.
*
040010 1 1 0 0 1000. 0.
040020 2 1 0 0 0. 0.
*
050011 0 0 500. -1. .1 1.22 10. 10. 0 1. 0. 0.
*
080011 0 1 1 0 10. 1. 1. 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11 0
080021 0 1 2 0 -10. 1. 1. 0 0 0 0 0 0 0 -2 0 0 11 0
*
130100 2 1 2 4 0 'LBS/SEC' 100. 100. 0.
130101 0. 10. 10000. 10.
130200 2 1 2 4 0 'LBS/SEC' 100. 100. 0.
130201 0. -10. 10000. -10.
*
140010 0 0 0 0
*
***** DATA TO BE OBTAINED FROM BLOWDOWN CALC. *****
*
140000 3 1 300. 0. .3 *****
*
141001 20 2 *****
141002 0.0 0. .01 0. .25 -0.759 .95 -30.56 *****
141003 1.3 -29.62 2. -39.34 2.5 -41.98 3.58 -37.39 *****
141004 4.26 -25.29 4.66 -35.69 7.25 -47.07 9.06 -37.53 *****
141005 9.96 -27.27 10.46 -36.04 12. -41.04 13. -41.68 *****
141006 17.4 -47.43 22.9 -30.42 27. -50.90 1000. -51.0 *****
*
***** DATA TO BE OBTAINED FROM BLOWDOWN CALC. *****
*
142001 0
143001 0
*
150011 0 1 1 0 0 0 2 0 1000. 1000. 0. 1. 0. 1. 0. 1.
*
160010 1 1 1 1 0 1.
*
170101 1 1 1 1 0 1. 1.
*
180101 2 0 10. 10000. 10.
*
190101 2 0 50. 10000. 50.
*

```

Table B 1 Input Data for ECC Flow Calculation During Refill Period

```

= ECC FLOW CALCULATION DURING REFILL PERIOD (MOD6)
** RESERVOIR PRESS. = COLD LEG PRESS. BEFORE EQBP
** = CONTAINMENT PRESS. AFTER EQBP
*
010001 0 7 3 4 3 2 1 4 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0
*
010002 0.0 1.0
*
020000 JW 1 JW 2 JW 3 JW 4 TM 3 AP 3 ML 1
*
030010 1 200 1 1 .1 0. 10.
030020 1 1000 1 1 .01 0. 42.
030030 10 1000 1 1 .001 0. 60.
*
040010 1 1 0 0 60. 0.
040020 2 -5 1 0 .001 0. * AC CLOSED
040030 3 1 0 0 35. 0. * LPIS+HPIS START
040040 4 -4 3 0 600. 0. * AC OPENED
*
050011 1 0 600. 125. 0. 4050. 16.9 11. 0 255. 10.4 -15.
050021 0 0 600. 125. -1. 120. 4. 4. 0 2.54 .73 -19.
050031 2 1 2300. 0. 1. 1.E8 1.E3 1.E3 0 1.E5 1.E5 -100.
*
080011 1 2 0 1 0. 1.254 -15. 0. 3. 3. 0 0 2 * AC-LINE
080021 2 3 0 2 0. 1.254 -19. 40. 3. 3. 0 0 0 * LINE-RESERV.
080031 0 3 2 0 0. .75 0. 0. 0. 0. 0 0 2 * LPIS
080041 0 3 1 0 0. .75 0. 0. 0. 0. 0 0 2 * HPIS
080012 0 1.1 0 11 0
080022 3 .9 0 11 0
080032 3 0. 0 11 0
080042 3 0. 0 11 0
*
060011 .8 -1.
060021 0. 1000.
*
070101 19 15.89 600.97 0. 1. 1.E3
070102 15.90 599.499 0. 1. 1.E3
070103 16. 593.048 0. 1. 1.E3
070104 17. 522.331 0. 1. 1.E3
070105 18. 439.283 0. 1. 1.E3
070106 19. 371.725 0. 1. 1.E3
070107 20. 314.258 0. 1. 1.E3
070108 21. 263.399 0. 1. 1.E3
070109 22. 214.961 0. 1. 1.E3
070110 23. 168.804 0. 1. 1.E3
070111 24. 126.561 0. 1. 1.E3
070112 25. 90.658 0. 1. 1.E3
070113 26. 63.677 0. 1. 1.E3
070114 26.61 51.744 0. 1. 1.E3
070115 30.5 34.871 0. 1. 1.E3 *CONTEMPT
070116 40.5 32.164 0. 1. 1.E3 *CONTEMPT
070117 50.5 30.225 0. 1. 1.E3 *CONTEMPT
070118 60.5 28.792 0. 1. 1.E3 *CONTEMPT
*
110010 2 0 0 0 0 0 0 * AC CLOSED
110020 -4 0 0 0 0 0 0 * AC OPENED
*
130100 3 2 9 4 0 *LBS/SEC* 14.7 100. 0. * HPIS
130101 1.0 894.23 140. 340. 580. 700. 960. 500.
130102 1170. 400. 1300. 320. 1320. 240. 1430. 160.
130103 1475. 80.
*
130200 3 2 8 4 0 *LBS/SEC* 14.7 100. 0. * LPIS
130201 1.0 4905. 28. 4500. 79. 3600. 119. 2700.
130202 150. 1800. 162. 1350. 157. 900. 171. 450.

```

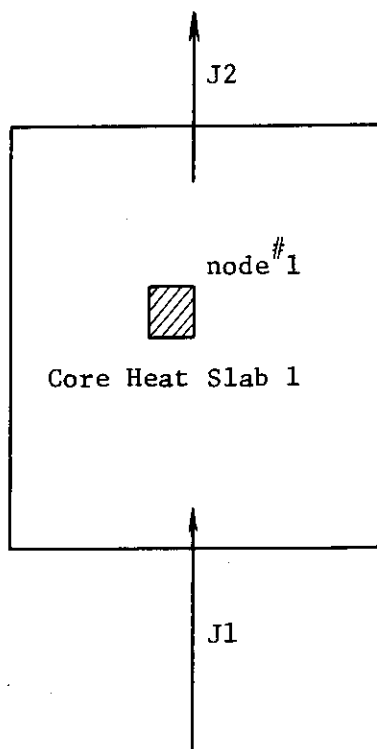


Fig. A 1 Noding Diagram for Power Calculation.

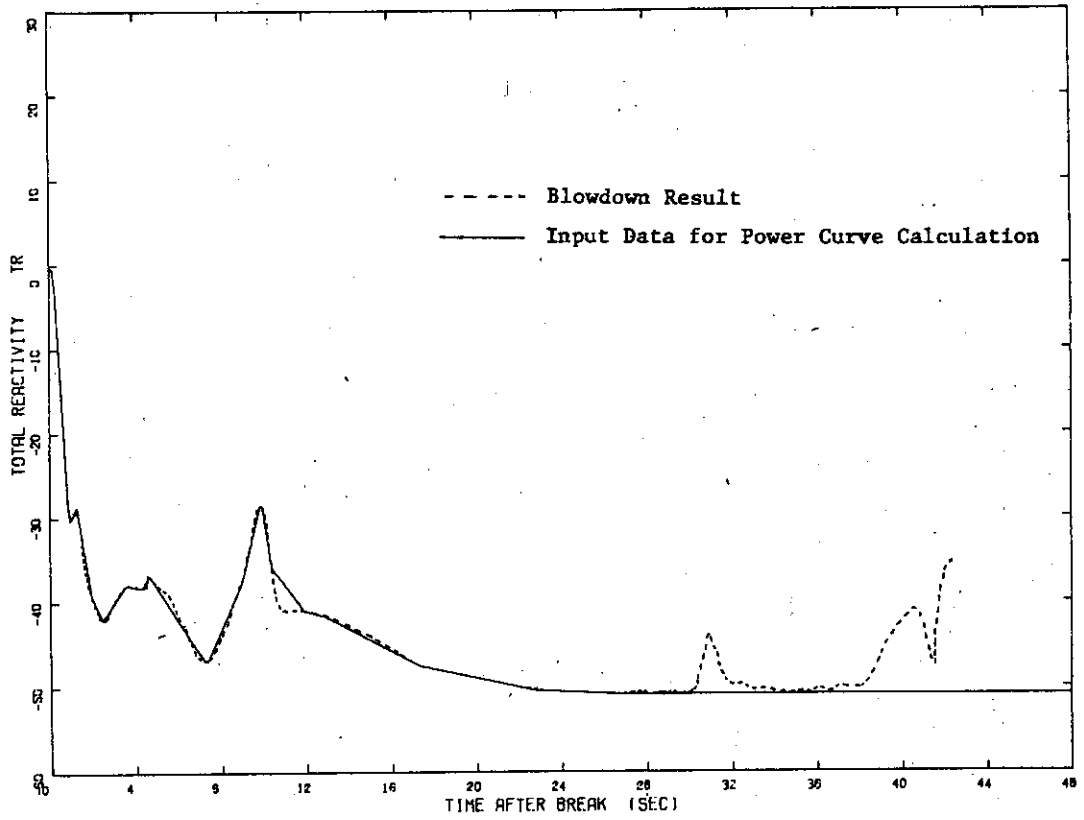


Fig. A 2 Reactivity Calculated by Blowdown Calculation and Input for Power Calculation

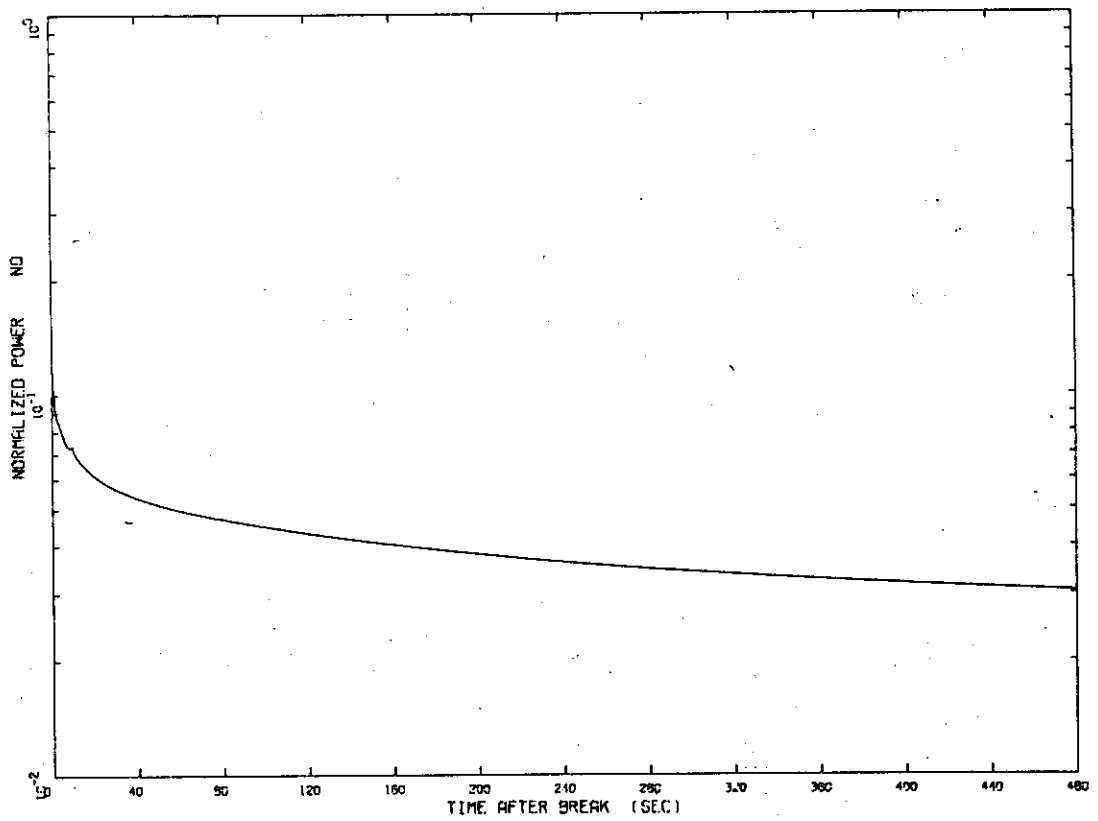


Fig. A 3 Normalised Power Calculated by RELAP4-POWER Calculation

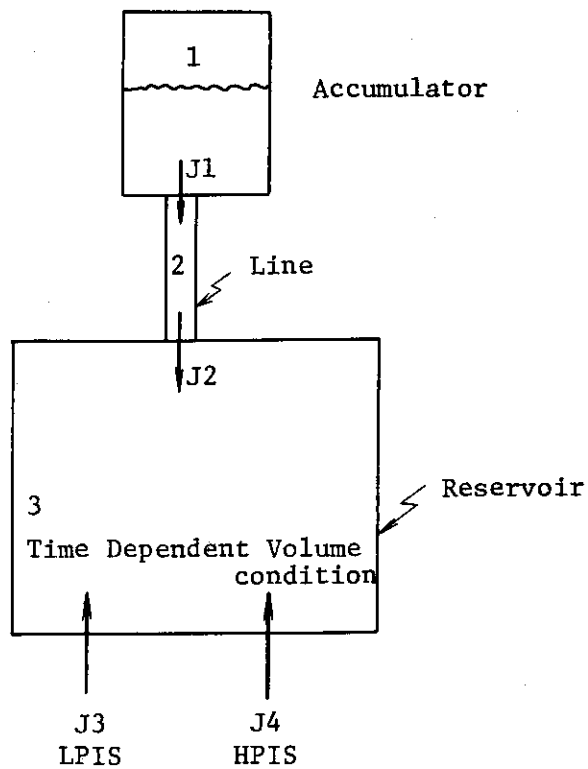


Fig. B 1 Noding Diagram for ECC Flow Calculation.

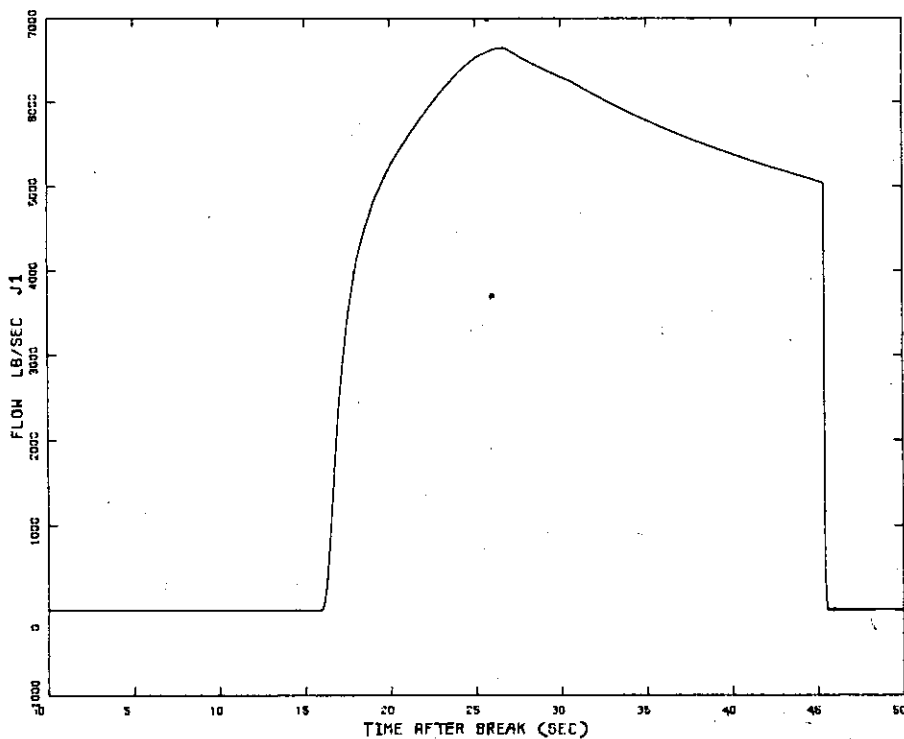


Fig. B 2 Accumulator Flow Rate by RELAP4-ECC Calculation with Input Data Mentioned in Table B.1

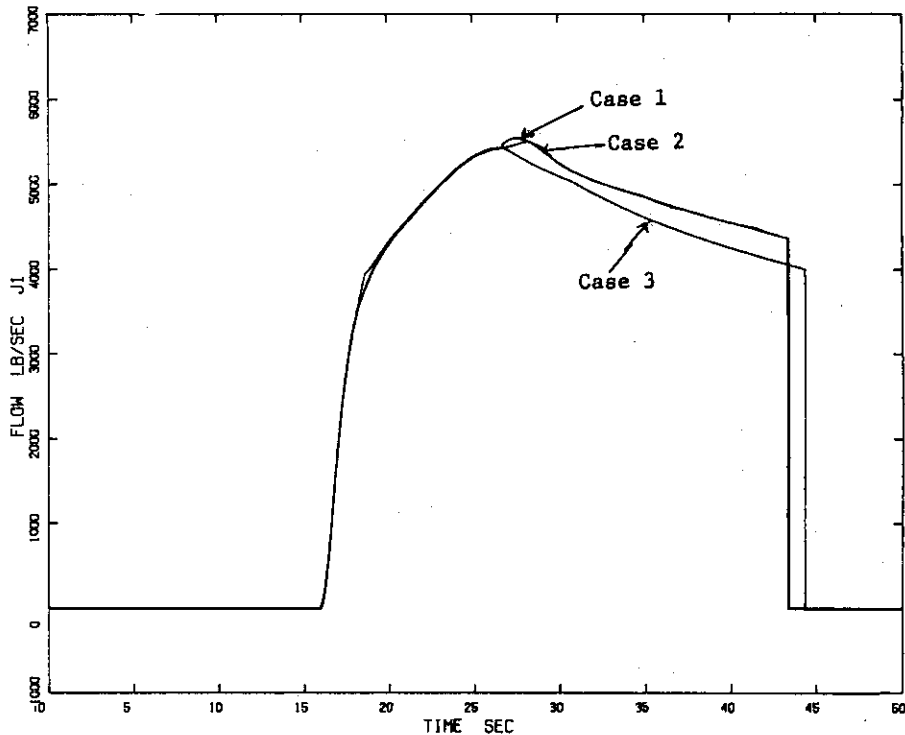


Fig. B 3 Accumulator Flow Rates in the Three Cases:
 Case 1; Blowdown Calculation
 Case 2; RELAP4-ECC Calculation with Reservoir Pressure Equal to Cold Leg Pressure of Blowdown Calculation
 Case 3; RELAP4-ECC Calculation with Reservoir Pressure Equal to Containment Pressure after End of Bypass

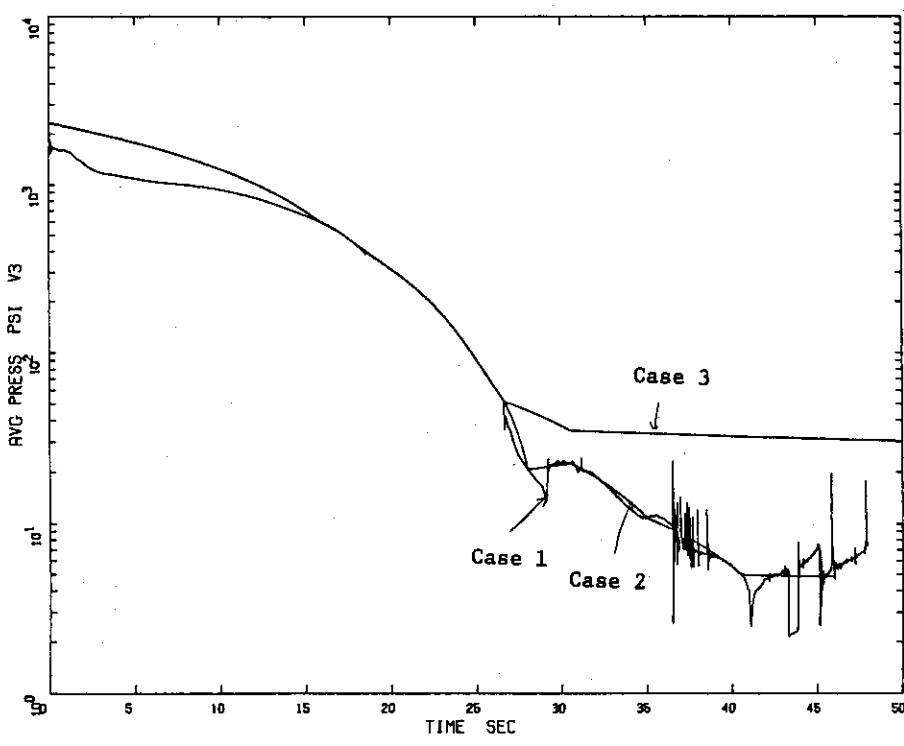


Fig. B 4 Reservoir Pressures in Three Cases

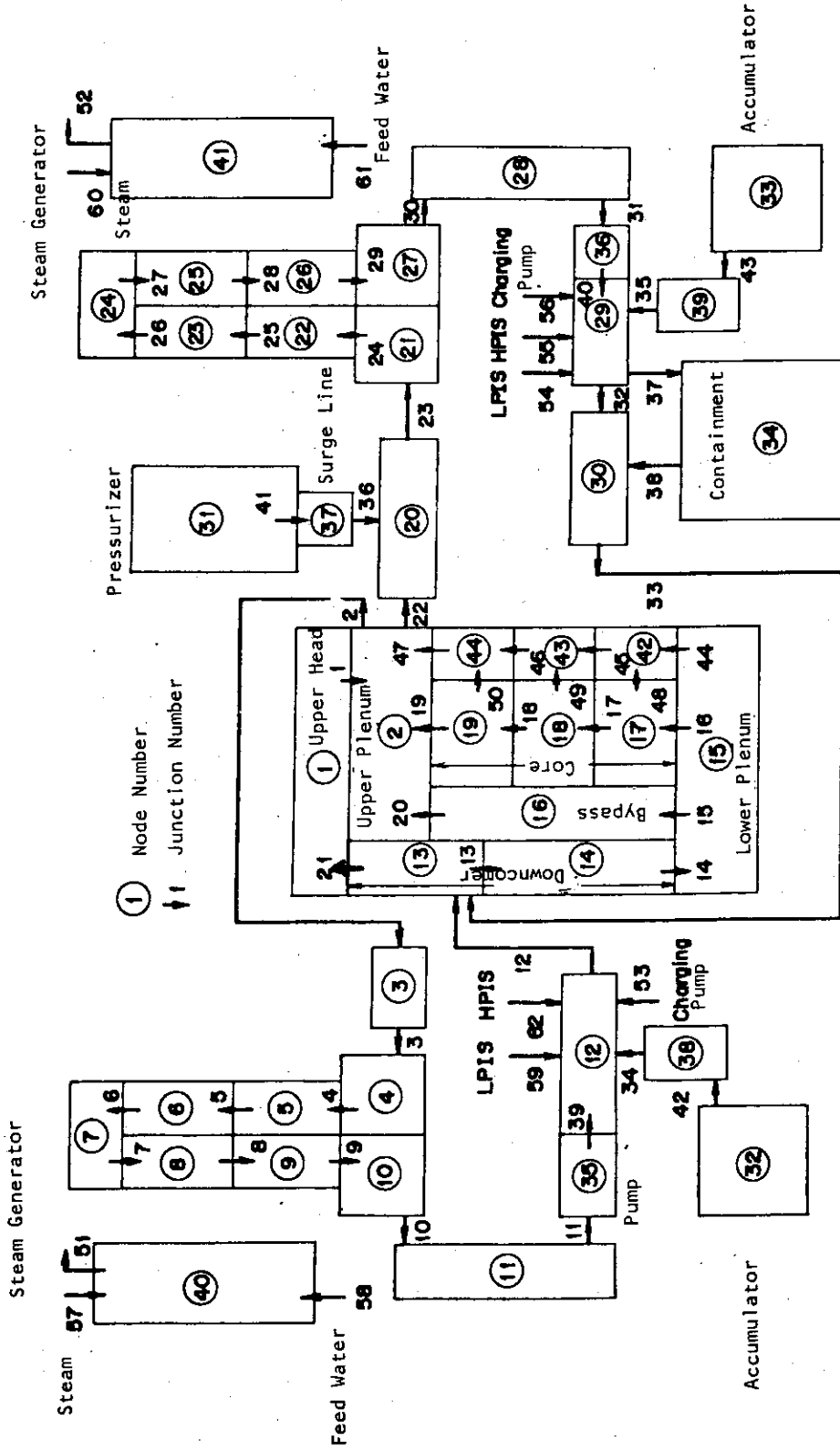


Fig. F 1 Example of Noding Diagram for PWR blowdown Analysis by RELAP4-EM

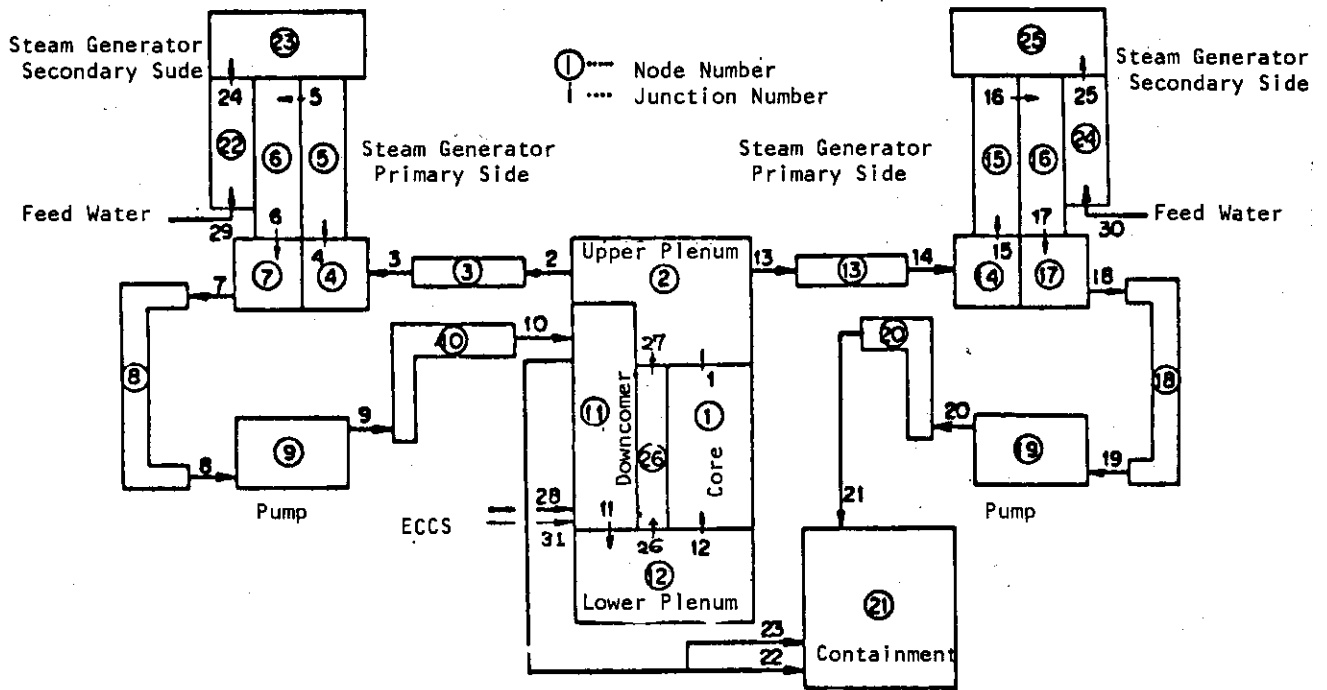


Fig. F 2 Example of Noding Diagram for PWR Reflood Analysis by RELAP4-FLOOD

① --- Node Number
 1 --- Junction Number

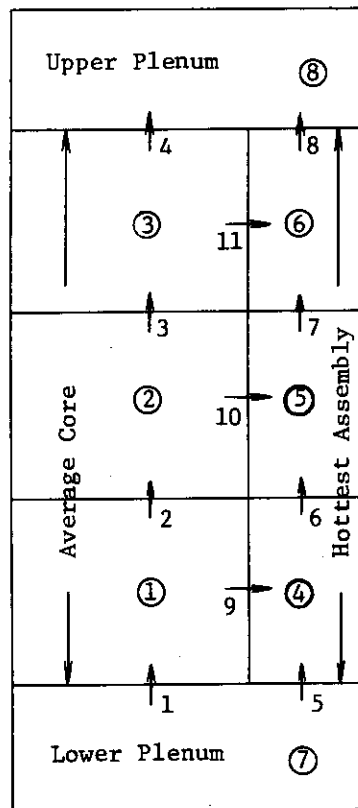


Fig. F.3 Example of Noding Diagram for PWR Hot Channel Analysis by RELAP4-EM

① --- Node Number
 1 --- Heat Slab Number

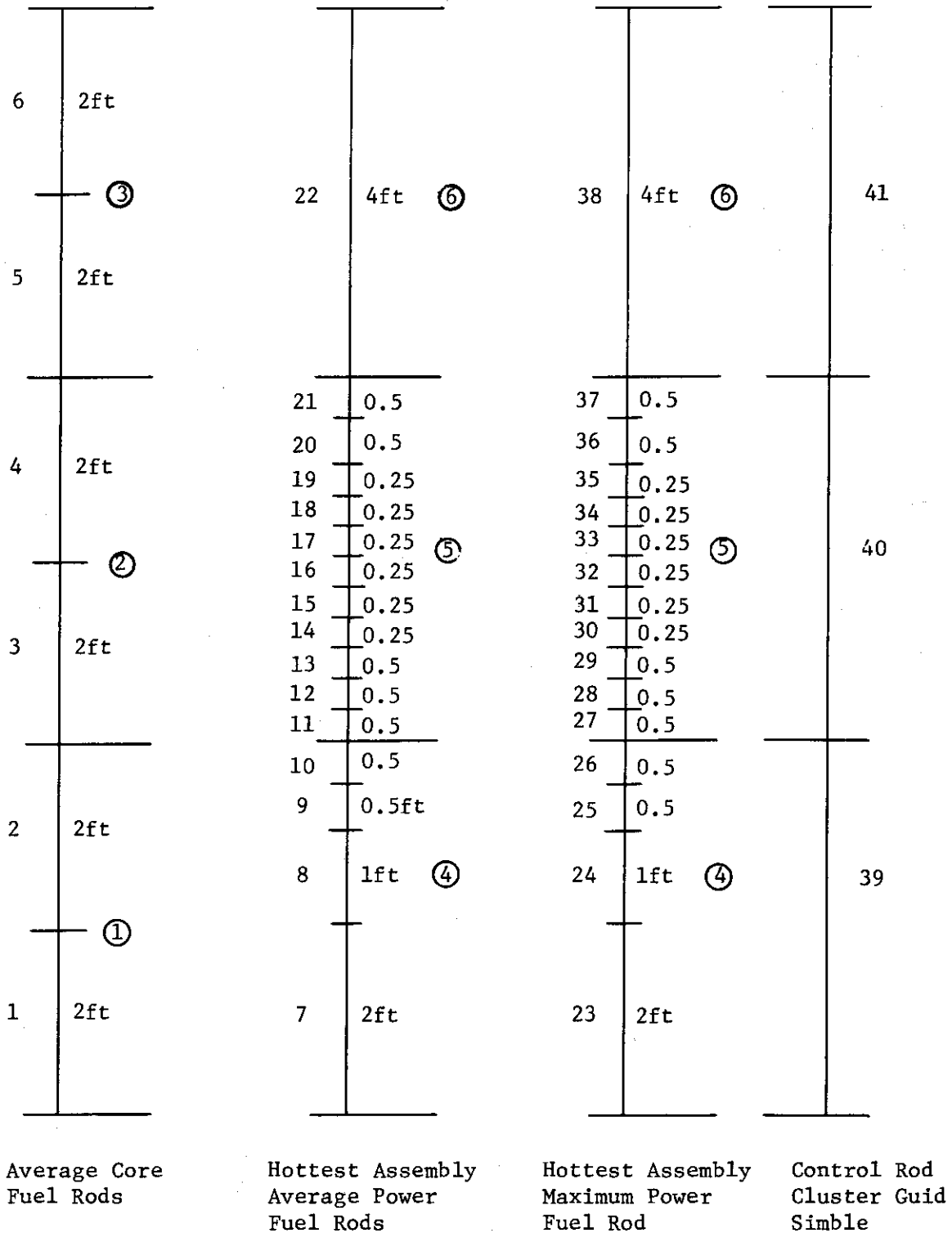


Fig. F.4 Example of Modeling Fuel Rods for PWR Hot Channel Analysis by RELAP4-Em

謝 辞

この報告書をまとめるにあたり、安全解析部長桂木学氏には構成その他について貴重な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) "WREM : Water Reactor Evaluation Model [Revision 1," NUREG-75/056, U.S. Nuclear Regulatory Commission (May 1975).
- 2) G.N. Lauben, "TOODEE2 : A Two Dimensional Time Dependent Fuel Element Thermal Analysis Program," U.S. Nuclear Regulatory Commission (May 1975).
- 3) 原子力安全局公開資料室, "伊方2号炉非常用炉心冷却装置に係わる機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Oct. 1976)
- 4) 原子力安全局公開資料室, "柏崎・刈羽原子力発電所の非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (April, 1977).
- 5) 原子力安全局公開資料室, "川内原子力発電所非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Sept. 1978).
- 6) K. Fujiki, T. Shimooke and Y. Murao, "RELAP/REFLA : A System Reflooding Analysis Computer Program," to be published as JAERI-M Report.
- 7) 下桶敬則, 吉田一雄, "PWR 燃料集合体ヒートアップ計算コード TOBUNRAD 説明書," JAERI - M 8211 (May, 1979).
- 8) 原子力安全局公開資料室, "高浜3, 4号炉非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Dec. 1978).
- 9) 原子力安全局公開資料室, "京都大学高中性子束炉一次冷却系主配管破断事故および炉心流路閉塞事故の評価解析書," 日本原子力研究所 (Aug. 1978).
- 10) 原子力安全局公開資料室, "大飯発電所の安全解析," 日本原子力研究所 (Jul, 1979) (原子力安全委員会月報第8号に転載)
- 11) 田辺文也, 吉田一雄, 松本潔, 下桶敬則, "TMI事故の熱水力学解析," JAERI - M 8653 (Jan. 1980).
- 12) F. Tanabe, K. Yoshida, K. Matsumoto and T. Shimooke, "Thermal-Hydraulic Analysis of the TMI-Accident by Using RELAP4/MOD6/U4/J2," NEWS LETTER of the NEA DATA BANK No.24 (Oct. 1980).
- 13) F. Tanabe, K. Yoshida, K. Matsumoto and T. Shimooke, "Post-Facta

謝 辞

この報告書をまとめるにあたり、安全解析部長桂木学氏には構成その他について貴重な助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) "WREM : Water Reactor Evaluation Model [Revision 1," NUREG-75/056, U.S. Nuclear Regulatory Commission (May 1975).
- 2) G.N. Lauben, "TOODEE2 : A Two Dimensional Time Dependent Fuel Element Thermal Analysis Program," U.S. Nuclear Regulatory Commission (May 1975).
- 3) 原子力安全局公開資料室, "伊方2号炉非常用炉心冷却装置に係わる機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Oct. 1976)
- 4) 原子力安全局公開資料室, "柏崎・刈羽原子力発電所の非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (April, 1977).
- 5) 原子力安全局公開資料室, "川内原子力発電所非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Sept. 1978).
- 6) K. Fujiki, T. Shimooke and Y. Murao, "RELAP/REFLA : A System Reflooding Analysis Computer Program," to be published as JAERI-M Report.
- 7) 下桶敬則, 吉田一雄, "PWR 燃料集合体ヒートアップ計算コード TOBUNRAD 説明書," JAERI - M 8211 (May, 1979).
- 8) 原子力安全局公開資料室, "高浜3, 4号炉非常用炉心冷却装置に係る機能と性能の評価解析書," 日本原子力研究所 (Dec. 1978).
- 9) 原子力安全局公開資料室, "京都大学高中中性子束炉一次冷却系主配管破断事故および炉心流路閉塞事故の評価解析書," 日本原子力研究所 (Aug. 1978).
- 10) 原子力安全局公開資料室, "大飯発電所の安全解析," 日本原子力研究所 (Jul., 1979) (原子力安全委員会月報第8号に転載)
- 11) 田辺文也, 吉田一雄, 松本潔, 下桶敬則, "TMI事故の熱水力学解析," JAERI - M 8653 (Jan. 1980).
- 12) F. Tanabe, K. Yoshida, K. Matsumoto and T. Shimooke, "Thermal-Hydraulic Analysis of the TMI-Accident by Using RELAP4/MOD6/U4/J2," NEWS LETTER of the NEA DATA BANK No.24 (Oct. 1980).
- 13) F. Tanabe, K. Yoshida, K. Matsumoto and T. Shimooke, "Post-Facta

- Analysis of TMI Accident," to be published.
- 14) 吉田一雄, 田辺文也, 松本潔, 下桶敬則, "RELAP4/MOD6/U4/J3 : A JAERI Improved Version of RELAP4/MOD6 for Analysis of LWR Transient Including Refill-Reflood Phase of BWR-LOCA," to be published as JAERI-M Report.
 - 15) S.R. Fischer, et al., "RELAP4/MOD6 - A Computer Program for Transient thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems - User's Manual," EG & G, CDAP-TR003 (Jan. 1978).
 - 16) 鴻坂厚夫, 石谷隆広, 熊倉利昌, 奈良岡賢逸, "冷却材喪失事故解析コードRELAP 4 / MOD 5 及び MOD 6 の FACOM 230 / 75 システムへの変換整備, " JAERI - M 8166 (March 1979).
 - 17) F.F. Cadek, et al., "PWR FLECHT (Full Length Emergency Cooling Heat Transfer) Final Report," WCAP-7665 (April 1971).
 - 18) F.F. Cadek, et al., "PWR FLECHT Final Report Supplement," WCAP-7931 (Oct. 1972).
 - 19) L.C. Richardson, et al., "CONTEMPT : A Computer Program for Predicting the Containment Pressure-Temperature Response to a Loss-of-Coolant Accident," Philips Petroleum Company, Atomic Energy Division, IDO-17220, Idaho Falls, Idaho (June 1967).
 - 20) CONTEMPT-LT/022, Argonne Code Center Abstract No.433 (Dec. 1973).
 - 21) 阿部清治, 佐藤一男, "SCORCH-B 2 : LOCA 時の原子炉炉心ヒート・アップのシミュレーションコード, BWR用, 第2版, " JAERI - M 6678 (Aug. 1976)
 - 22) J.D. Duncan and J.E. Leonard, "Emergency Cooling in BWR's Under Simulated Loss-of-Coolant Conditions," GEAP-13197 (June 1971).
 - 23) A.E. Rogers and J.E. Leonard, "An Analytical Model of the Transient Core Spray Cooling Process," Proceeding of A.I. ChE Meeting Symposium on Heat Transfer in Water Cooled Nuclear Reactor Systems (Dec. 1971).
 - 24) Y. Murao, "An Analytical Study of the Thermal-Hydraulic Behavior of the Reflood-Phase During a LOCA," KFK 2545, Gesellschaft für Kernforschung mbH. (Dec. 1977).
 - 25) K.R. Katsma, et al., "RELAP4/MOD5 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems - User's Manual," ANCR-NUREG-1335, Aerojet Nuclear Company (Sept. 1976).
 - 26) 井上公夫, 田辺文也, 松本潔, "SUS 被覆管燃料のための RELAP 4-EM と TOOD - EE 2 の改良, " JAERI - M 9200 (Nov. 1980)
 - 27) J.F. Wilson, R.J. Grenda and J.F. Patterson, "The Velocity of Rising

- Steam in a Bubbling Two-Phase Mixture," Transactions of the American Nuclear Society (May 1962).
- 28) G.J. Scatena and G.L. Upham, "Power Generation in a BWR Following Normal Shutdown or Loss-of-Coolant Accident Conditions," NEDO-10625 (Apr. 1973).
- 29) H. Uchida, A. Oyama, and Y. Togo, "Evaluation of Post-Incident Cooling Systems of Light Water Power Reactors," Proc. Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol.13, Session 3.9, United Nations, Geneva (1964).
- 30) 石川迪夫, 他, "格納容器温度圧力解析コード CONTEMPT の検討", JAERI -M 5339 (1973).
- 31) P.S.Ayyaswamy, et al., "Reactor Containment Heat Removal by Passive Heat Sinks Following a Loss-of-Coolant Accident," Nucl. Technol., Vol.33, p.243 (May 1977).
- 32) "Minimum Containment Pressure Model for PWR ECCS Performance Evaluation," U.S. Nuclear Regulatory Commission, B.P.T. CSB6-1 (Nov. 1975).
- 33) D.C. Slaughterbeck, "Review of Heat Transfer Coefficients for Condensing Steam in a Containment Building Following a Loss-of-Coolant Accident," IN-1338 (Sept. 1970).
- 34) S. Kawasaki, T. Furuta and M. Suzuki, "Oxidation of Zircaloy-4 under High Temperature Steam Atmosphere and 1st Effect on Ductility of Cladding," J. Nucl. Sci. Technol. Vol.15, p.585 (Aug. 1978).
- 35) S. Ikeda, et al., "Oxidation of Zircaloy-2 in High Temperature Steam," J. Japan Inst. Met., Vol.39, p.710 (1975).
- 36) "Exxon Nuclear Company WREM-Based Generic PWR ECCS Evaluation Model," XN-75-41, Volume II, Appendixd (Oct. 1975).
- 37) "Exxon Nuclear Company WREM-Based Generic PWR ECCS Evaluation Model," XN-75-41, Suppl.6 (Oct. 1975).
- 38) "Exxon Nuclear Company WREM-Based Generic PWR ECCS Evaluation Model," XN-75-41, Suppl. 5 (Oct. 1975).
- 39) L.P. Leach, L.J. Ybarrando, and G.D. McPherson "Experimental Emergency Core Cooling Results from LOFT Non-Nuclear Tests," Nucl. Technol., Vol.33, 126-149 (Mid-April 1977).