

JAERI-M

6 3 6 2

R O S A - II 研究計画

1 9 7 6 年 2 月

斯 波 正 誼・安 達 公 道・生 田 目 健
岡 崎 元 昭・傍 島 真・鈴 木 光 弘

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

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

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

ROSA-II 研究計画

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

斯波正誼・安達公道・生田目 健・岡崎元昭
傍島 真・鈴木光弘

(1975年12月7日受理)

ROSA-II 実験計画は、加圧水型原子炉の冷却材喪失事故における、一次冷却系内の熱水力学的挙動を、総合実験によって解明しようとするものである。

本報告書では、ROSA-II 計画の研究目標、実験装置の概要、予備解析の結果から実験に要請される事項等について述べる。

Experimental Program ROSA-II

MASAYOSHI SHIBA, HIROMICHI ADACHI, KEN NAMATAME,
MOTOAKI OKAZAKI, MAKOTO SOBAYAMA, MITSUHIRO SUZUKI.

Division of Reactor Safety, Tokai, JAERI

(Received December 17, 1975)

The experimental program ROSA-II is carried out to study the thermal and hydrodynamic behaviors in the primary cooling system of a pressurized water reactor in a loss-of-coolant accident; the ROSA-II (Rig of Safety Assessment) is an integral test facility.

Concerning the program, its purpose, the facility, and requirements for the experiment itself revealed by a pre-analysis, are described.

目 次

1. 緒 言	1
2. ECCS の効果に関する問題点	3
2-1 LOCA 過程のあらまし	3
2-2 LOCA における一次系内の熱水力挙動	3
2-3 ECCS の炉心バイパス	4
3. 研究目的および内容	8
3-1 研究目的	8
3-2 研究内容	8
4. 実験装置	15
4-1 設計方針	15
4-2 実験装置	17
4-3 炉心計測法の開発	36
5. 予備解析の結果	64
5-1 予備解析の目的	64
5-2 RELAP-3 による飽和減圧過程の予備解析	64
5-3 DEPCO-MULTI による未飽和減圧過程の予備解析	68
APPENDIX	
I 低温側配管破断の解析結果と考察	75
I-1 ECCS 注入の有無による比較	75
I-2 ボリューム構成の違いによる比較	77
I-3 最悪破断条件の追究	77
I-4 ECCS 最適注入条件の追求	80
II 高温側配管破断の解析結果と考察	96
II-1 ECCS 注入の有無による比較	96
II-2 配分破断の特徴の比較	97
II-3 最悪破断条件の追究	97
II-4 ECCS 最適注入条件の追究	98

1. 緒 言

現在運転中、あるいは建設中の軽水型原子力発電所の安全性は、設計、材料、製作施工、運転、安全防護装置等、各方面からの検討によって、十分に確保されていると考えられている。現在までに重大な事故を経験していないという事実は、たしかに軽水型原子力発電所の安全性を裏書きするものではあるが、一方、工学的安全防護装置について云えば、現実の事故においてそれが使用された経験がない事を意味し、したがって万一の場合に設計通りの機能が発揮されるかどうかを、できるだけ実炉に近い規模での模擬試験により実証しておく必要がある。技術の進歩とエネルギーの有効的利用の見地から、軽水型原子力発電所は今後ますます高性能化、大型化、需要地接近化、集中化の方向をたどるものと予想されるし、また公害防止や自然環境の保全の見地からも、安全技術および安全評価法の実証的な開発研究への要求は、今後ますます強まるものと予想される。

加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, 略称 PWR) の安全評価においては、重大事故 (Maximum Credible Accident, 略称 MCA) として、一次冷却系配管の破断による、いわゆる冷却材喪失事故 (Loss of Coolant Accident, 略称 LOCA) が考えられている。原子炉施設には各種の安全防護装置を備え、この事故を想定した場合でも、周辺の一般公衆に放射線障害をおよぼさない程度に、事故の影響を小さくするように配慮されている。

本研究計画でとり上げる非常炉心冷却系 (Emergency Core Cooling System, 略称 ECCS) は、このような安全防護装置の一つであって、冷却材喪失事故の際に、一次冷却系の各所に冷却水を注入することによって燃料の過熱を防ぎ、熔断や破損を起さないようにするものである。ECCS には、高圧注入系 (High Pressure Coolant Injection System, 略称 HPCI)、低圧注入系 (Low Pressure Coolant Injection System, 略称 LPCI) および蓄圧注入系 (Accumulator System, 略称 ACC) の 3 種類がある。

ECCS の有効性については、米国の LOFT 計画の "Semiscale Blowdown and ECCS Program" において、1970年11月から1971年2月までに、ACC を用いて行なわれた 6 回の実験の結果が思わしくなかったことから、大いに疑問視されるようになった。すなわち、ECCS から一次系に注入された冷却水が炉心へ流れずに破断口から流出してしまう現象 (ECC 水の炉心バイパス) がにわかにクローズアップされた。

ECC 水が炉心をバイパスして破断口から流出してしまった機構については、多くのデータを総合して、次のように解釈された。すなわち、注入の初期の段階においては、ECC 水のわずかな部分のみが下部プレナムの底に落ちて残存水と混合するが、大部分は炉心から逆流してくる蒸気に巻き込まれて、破断口の方へ流されてしまう。蒸気速度が遅くなってくると、下部プレナム内に ECC 水の蓄積が始まって水位が上昇するが、水位がコアバレルの下端に達すると、破断口へ通ずる蒸気流路は閉そくする。すると炉心側で生ずる背圧が増大して水位を押し下げ、再び蒸気通路をあける。この背圧生成と解放の繰り返しによって、いわゆるチャギング現象を生じ、下部プレナム内の ECC 水を蒸気流とともに破断口へ押し出してしまう。

以上のような一連の現象は、実験装置の寸法が小さいことによる固体壁の蓄積熱の違いの他に、破断ループだけで健全ループがないこと、注入したのが ACC のみで、数種の ECCS による複合効果がないこと等が、重要な影響因子となった可能性がある。したがって、これらの点を改良した総合実

実験によって、ECCSの効果を確認しておくことが望まれる。本報告書で概要を紹介する ROSA - II 計画は、この期待にこたえるために、先行実施していた ROSA - I にひきつづいて実施するものである。ROSA - I 計画が ECCS 作動以前のブローダウン過程の事故現象把握を目的とし、それも原子炉圧力容器から直接に冷却材が流出するという単純化された場合を取扱ったのに対して、ROSA - II 計画は蒸気発生器、循環ポンプ、加圧器を含む一次冷却系ループをそなえた系について、ブローダウン開始から ECCS 作動後までの一連の事故現象の過程を解明し、ECCS の効果におよぼす諸因子の影響を明らかにすることを目的としている。ROSA - II 装置の中で生ずる事故現象は、そのまま大型の実用炉における事故現象を模擬するものではないが、事故現象の本質の実証的把握と、解析モデルの改良等に役立つ基礎的知見の蓄積を可能とし、実用炉の安全評価を行なう上での重要な資料を提供し得るものと期待される。

最後に、ROSA - II のような総合実験が、実用炉の安全評価にどのような形で貢献するのかについて述べる。実用炉の安全評価は、流体力学、熱力学、伝熱工学等を含む基礎科学と基礎実験の知識を総合して作られた安全評価コードを用いて行なわれる。安全評価コードの適用性は、実用炉の LOCA 現象の本質を模擬した総合実験によって確認され、保証される。したがって、総合実験が結論を出すのは、安全評価コードの妥当性についてであって、実用炉の安全性について直接に何らかの判断を下すものではないことを特に強調しておく。

2. ECCSの効果に関する問題点

2-1 ECCSの効果に関する問題点

軽水炉の一次系配管破断に続く一連の事故現象の展開の過程は、炉型、破断位置、破断規模、破断時の運転条件、バックアップ系の作動等によって一様ではないが、その概略を述べれば下記の通りである。

まず、破断直後に、圧力波、水撃、ミサイル発生等があり、これらによりスクラム機構を含む炉内構造物、ECCS、格納容器等に破損を生じれば、それぞれのバックアップ系の作動性能が失われる。

ついで、一次系の水、蒸気の流出にともなう一次系圧力低下がおこり、これを補償する形でボイドが発生し、その結果、一次系の流動抵抗が増大して、循環流量が低下する。圧力低下、流量低下およびボイド率の増大により、燃料のDNB (Departure from Nucleate Boiling) が起る。さらに炉心内の水位が低下して、燃料の露出が起る。

DNBおよび燃料の露出は、ともに燃料表面の熱伝達をいちぢるしく低下させるが、一方たとえスクラムが働いたとしても、崩壊熱、蓄積熱のために、燃料棒表面における熱流束はかなりの値に維持される。そのため、もしECCSが十分有効に作動しなければ、燃料棒被覆材の温度は急上昇する。

燃料棒被覆材が熔融するか、あるいは熱応力やFP稀ガスによる内圧上昇その他の原因で破損すると、一次系内に放射性物質が放出される。一次系流体に伴われて格納容器内に放出された放射性物質の相当部分は、格納容器スプレーや非常用フィルター等により除去されるが、たとえミサイル等により格納容器の健全性が失われなかったとしても、格納容器の圧力が上昇すれば、漏洩量の増大の形で、一部の放射性物質は大気中に放出される。

以上の事故現象の展開の因果関係は、Fig. 1にやゝ詳しく示してある。

2-2 LOCAにおける一次系内の熱水力挙動

LOCA過程において、燃料棒被覆材の最高温度がいくらになるかは、最も重要な問題点であるが、燃料棒表面における伝熱特性を支配しているのは、一次冷却系内の水、蒸気の流動の挙動である。

一次冷却系流路を、分岐や急な断面積変化がない多数のLegの結合と考えて、その1つについて流動挙動の因果関係を追跡してみると、下記の通りである。

Legに流入する流体の温度、クォリティおよび流量が低下すると、Legの保有エンタルピーが減少する。Legを構成する構造物の蓄積熱の解放は、このエンタルピー減少を抑制する作用をする。この他、炉心では炉心発熱が同じくエンタルピー減少を抑制し、蒸気発生器(SG)では、一次系温度が二次系温度よりも高い間はエンタルピー減少を促進し、温度の関係が逆転すれば、逆に抑制作用に移行する。

これらの結果、Legの保有エンタルピーが減少すれば、Leg内の圧力が低下する。各Legの圧力低下は、一次系全体としての圧力低下につながり、破断口からの流出流量の低下をもたらすが、Leg内の流体挙動に着目すれば、Leg内の二相流体のクォリティの値によって、蒸気が発生する場合と、逆に凝縮する場合とがある。ECCSからの冷却水の注入は、非常に激しい蒸気の凝縮をひきおこす可能性がある。蒸気が発生すれば、Leg内のボイド率が急増大し、Legから外に向かって流れが発散する可能性がある。逆に凝縮がおこれば、Leg内のボイド率が急減少して、Legの外から流れが集中して

くることになる。場合によってはこの2つが交互におこって、流れが振動し、大きな圧力振動をひきおこすことも考えられる。また、凝縮に伴う流れの集中が、大きな圧力パルスを生じさせる可能性があり、圧力振動と共に、Legの冷却可能な形状を破壊する可能性も考えられる。

単相流Legにあっては、保有エンタルピーの減少はそのまま流出温度の低下であり、ECCSからの注水はそれを促進する方向に作用する。二相流Legにあっては、圧力の低下がそのまま流出温度の低下につながるが、ECCSの注水は、蒸気の凝縮を介して、やはりそれを促進する方向に働く。

Leg圧力の低下は流出流量の低下につながり、ボイド率の増大は流出クオリティの減少にマイナスの効果をもたらす。

以上は1つのLegについての考察結果であるが、実際の一次冷却系は、多数のLegの結合であるから、流入流体については、多数のLegからの流体の混合が問題になり、逆に流出流体については、多数のLegへの流れの分配が問題となる。

また、特に炉心部にあっては、ボイド率の上昇が熱除去能力の減少を介して、燃料温度の上昇につながると同時に、自由表面の盛り上がり、熱除去能力の減少にマイナス効果をもたらすことに注目する必要がある。

以上述べた、Leg内の熱水力学的挙動のシーケンスは、Fig. 2に示してある。

2-3 ECCSの炉心バイパス

ECCSの目的は、2-1で述べたLOCA過程における燃料棒被覆材の温度上昇を制限して、被覆管の破損を防止し、放射性物質が一次系に放出され、さらに大気へ放射されることを未然に防止することにある。

ECCSが作動した時に、注入圧力が、その時点における一次系の圧力に較べて十分に高ければ、注入水が一次系内に入ることは確実である。また、十分な量の水が炉心に到達すれば、燃料棒被覆材温度が許容限度以下に抑えられることもかなり確かである。しかしながら、ECCS注入位置から破断口に到る経路には、一般に(i)炉心を経由するものと、(ii)炉心を経由しないものとの2種類があるので、一次系に入った注入水が必ずしも炉心に到達するとは限らない。ECCSの注入水が炉心を経由しないで破断口から流出してしまう現象を炉心バイパスと云い、ECCSの有効度は、この炉心バイパスの程度に強く依存するということになる。

ECCS注入水の炉心バイパス現象の原因にはいろいろのものが考えられる。以下にその概要を述べる。(冷却水が炉心に到達しても、炉心の一部に部分的に到達しないところがあれば、炉心冷却が不十分である点において同じであるので、以下ではそのような場合も炉心バイパスの中に入れて考える。)

[A] 主として炉心内にある原因

- (i) 燃料棒が蒸気中に露出して高温になってしまうと、その後ECCS注入水が炉心端部に到達しても、その一部が炉心内に入れば激しく沸騰、蒸発するので、その膨張圧によって、それ以上はECCS注入水が炉心に入らなくなる。
- (ii) ECCS注入水が炉心の上方から供給される場合、上向き蒸気または二相流速が大きい間は、ECCS注入水はその流れにはこび去られて炉心に入らない。(炉心フラッシング)
- (iii) 燃料棒の変形等により、炉心流路の一部が閉そくされると、その部分の流動抵抗が大きいため

に、局部的にECCS注入水が到達できなくなる。(流路閉そく)

- (iv) ECCS注入水が炉心内の非発熱固体面にそって流れてしまい、高温の発熱面には到達できない。

[B] 主として炉心以外にある原因

- (i) ECCS注入水が、一次系構造物の蓄積熱等のために蒸発してしまつて、炉心に到達できない。
- (ii) ECCS注入水の一部が蒸気発生器の二次側保有水や一次系構造物の蓄積熱により激しく沸騰蒸発する(蒸気バイディング)時の膨張圧によって、炉心に到達することができない。
- (iii) ダウンカマー部の水位が不十分(マンメーター効果)なため、ECCS注入水が炉心部抵抗にうちかって炉心に入ることができない。
- (iv) ダウンカマー部の上向き蒸気または二相流速が大きい間は、ECCS注入水はその流れにはこび去られて下部プレナムに到達することができず、したがつて炉心に入ることができない。(ダウンカマー部フラッディング)
- (v) 一次系(蒸気発生器)の \cap 部に蒸気が溜つて、ECCS注入水の流れが妨げられる。

[C] 一次系全体にかかわる原因

- (i) ブローダウン過程においては、高温水があるところはすべて加圧器として働いている。また、一次系内の流れは二相流となつており、時々刻々流動抵抗が変化している。この加圧器効果と、各部の流動抵抗のバランスとによって、一次系内の流れが決ってくるが、ECCS注入位置における流れが炉心をバイパスして直接破断口に向つている場合には、ECCS注入水がその流れに押流されてしまい、炉心に到達できない。
- (ii) ECCS注入水が、蒸気または二相流体中に注入されると、激しい凝縮がおこつて、局部的に圧力の低下を生ずる。それが一次系全体の流動のバランスを変えて、炉心バイパスをうながす。
- (iii) 衝撃波、水撃、圧力振動等によりECCS注入配管が破損したり、炉心の冷却可能な形状が破壊されたりすれば、ECCSの機能は失われる。
- 以上は、あくまでも予想される原因であつて、必ずこれらが起るといふことではない。また、たがいに関連しあつたり、同時におこつたりすることもあり得る。

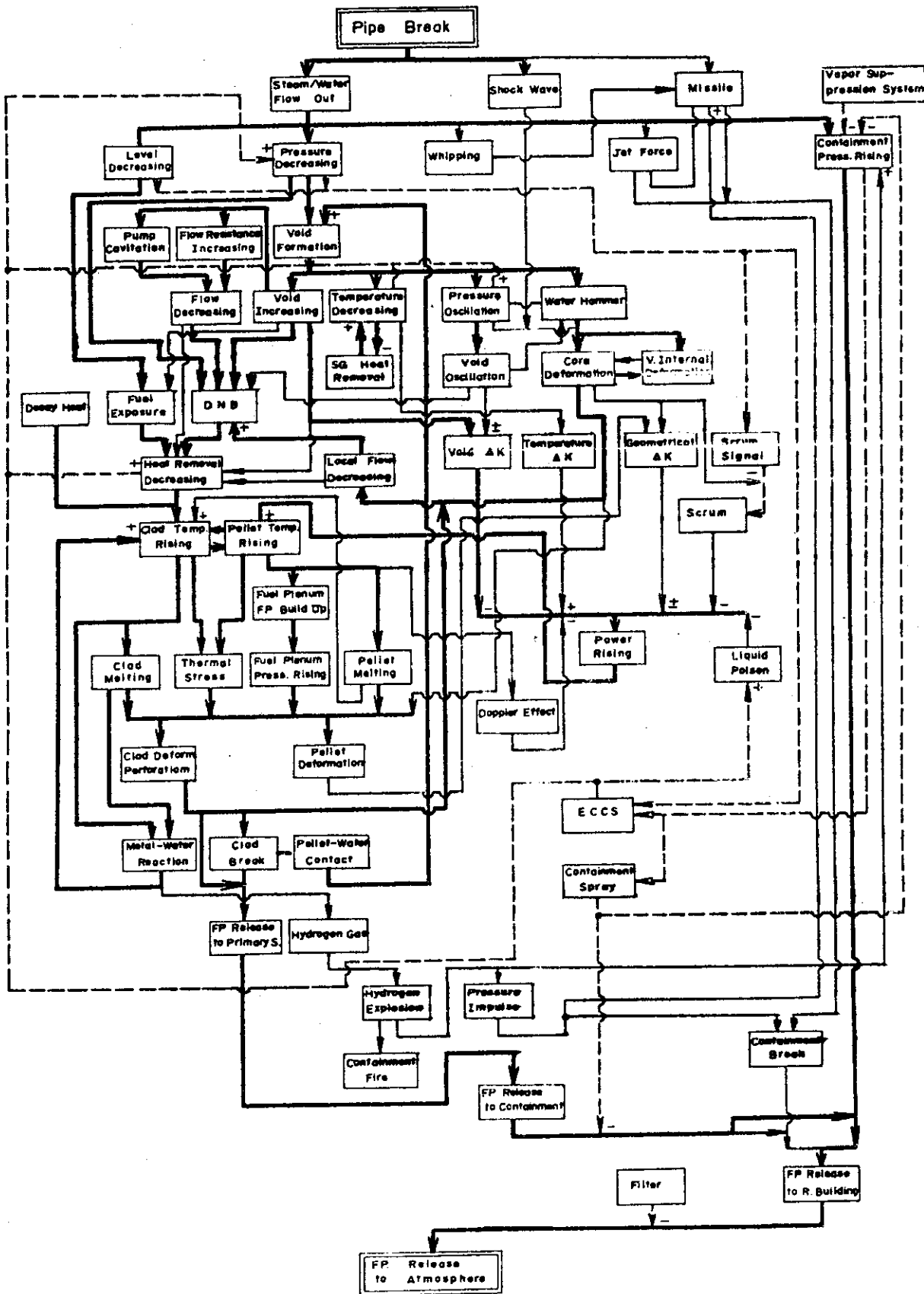


Fig. 1 Loss-of-Coolant Accident Sequence in LWR

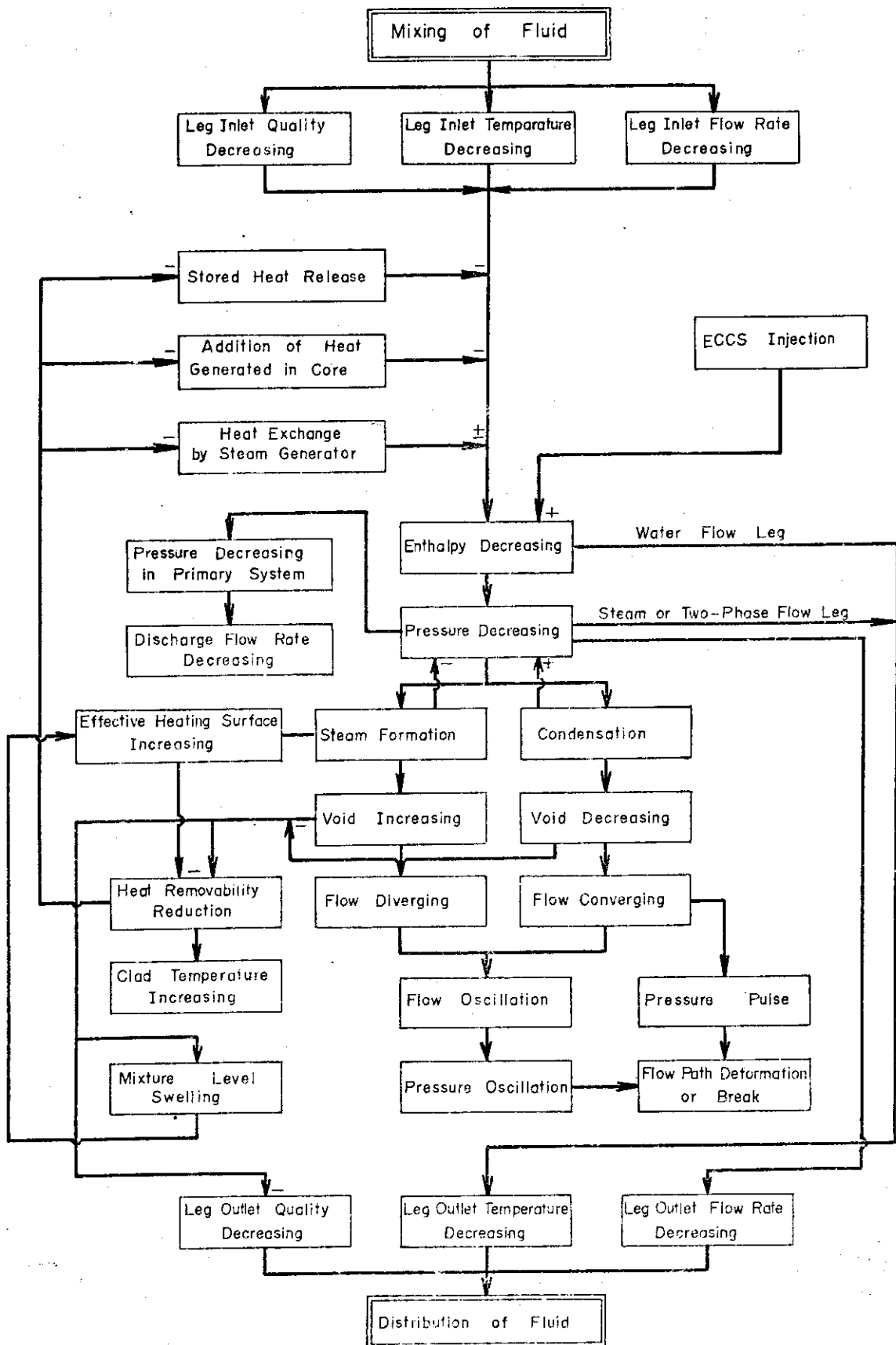


Fig. 2 Fluid Behavior in a Leg of Primary Cooling System during LWR-LOCA

3. 研究目的および内容

3-1 研究目的

軽水型動力炉のうち、とくにPWRの冷却材喪失事故時における非常炉心冷却系(ECCS)の作動とその効果について、熱水力学および機械的挙動に影響を及ぼす諸因子の究明、現象の推移の適確な把握、およびECCSの最適作動条件の確立や、最悪作動条件での余裕度の確認等を行ない、安全性評価を行なう上で参考となる実験データを得る。さらに、既存の安全解析コードの検証や、実験データに基く新しい計算モデルの開発等を行なう。

なお、BWRの冷却材喪失事故に関する試験研究(ROSA-III計画と称する。)は、PWRのそのの終了後、昭和52年度から実施する予定である。

3-2 研究内容

上述の研究目的を達成するために、ROSA-II試験装置の一次冷却系配管を人為的に破断し、ECSからの注入を行なって、以下の各量の測定を行なう。

[A] LOCA前の運転状態

- (i) 一次系代表圧力
- (ii) 一次系代表流体温度
- (iii) 一次系循環流量
- (iv) 燃料発熱量
- (v) 二次系代表圧力
- (vi) 二次系代表流体温度

[B] 破断の条件

- (i) 破断タイミング
- (ii) 各種連動動作の作動タイミング

[C] 破断直前からLOCA終了までの事故現象の推移

- (i) 一次系各部圧力(圧力波測定を含む)
- (ii) 破断口オリフィス前後圧力
- (iii) 一次系各部差圧
- (iv) 一次系各部流体温度
- (v) 燃料棒表面温度および被覆材内面温度
- (vi) 炉心流速、クォリティ、ボイド率等(計測技術を開発中)
- (vii) 流出流量(安全凝縮法)
- (viii) 流出二相流のクォリティ(完全凝縮法)
- (ix) 燃料発熱量およびトリップタイミング
- (x) 一次系循環ポンプ回転数およびトリップタイミング
- (xi) 二次系代表圧力
- (xii) 二次系代表流体温度

[D] ECCS 作動条件

- (i) 注入開始および終了タイミング
- (ii) 注入流量
- (iii) 注入水温度

[E] LOCA 終了後の状態

- (i) 破断 10 min 後の P V 残存水量

これらのうち, [B], [C], [D] に属する各項目の測定計器およびフローシート上の測定位置の詳細は, Table . 1 および Fig . 3 に示してある。

また, ROSA - II 試験の主な試験項目と, それを実施する上で選択すべき主なパラメータについては, Table . 2 にまとめてある。

ROSA - II 計画においては, ブローダウン過程および ECCS 作動以後の, 一次系内の二相流挙動およびそれに伴う炉心熱伝達機構の遷移や, 燃料温度の挙動の解明に重点を置く。したがって, 解析上の目標も, 主として二相流挙動および熱伝達機構の遷移条件の解明に焦点を合わせるが, これと併行して, 未飽和減圧過程における圧力波伝ばの解析も行なう。

これらの解析においては, ROSA - I, ブローダウン伝熱流動実験, 再冠水模擬実験など, 原研で実施したまたは実施中の関連研究の成果はもちろん, SAFE project, 電総研の実験, LOFT 計画 (Integral Test および Semiscale Blowdown and ECCS Test) など, 国内国外の研究成果もとり入れる。また, 原研においては, 別に LOCA 過程についての安全評価コードの開発整備を実施しているので, それとの関連も密接にして行く。

Table 1 Measurement for ROSA-II ECCS Test
For the Test Using No.1 or No.2 Fuel Assembly.

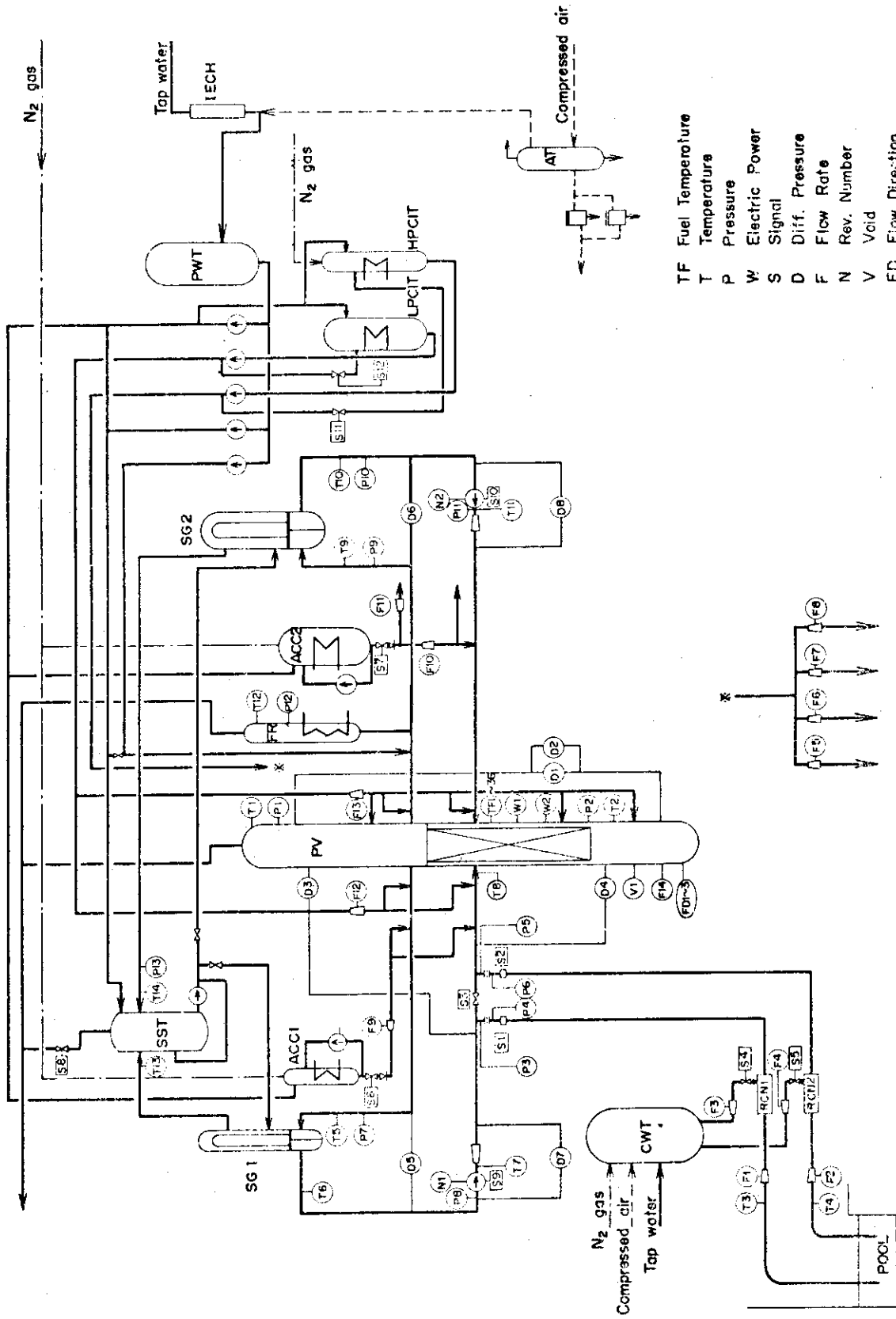
DATA CH. NO.	MEAS. ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	ACCURACY	
1	PRESSURE	P-1	PV UPPER PLENUM	SEMI CONDUCTIVE PRESSUER TRANSDUCER	PMS-1OKTM-200H	0-165 Kg/cm ² , 0-±5V	± 2.4 %
2	"	P-2	PV LOWER PLENUM		"	"	"
3	"	P-3	ABOVE NO.1 ORIFICE		"	"	"
4	"	P-4	BELOW NO.1 ORIFICE		"	"	"
5	"	P-5	ABOVE NO.2 ORIFICE		"	"	"
6	"	P-6	BELOW NO.2 ORIFICE		"	"	"
7	"	P-7	SG 1 INLET		"	"	"
8	"	P-8	P 1 PUMP SUCTION		"	"	"
9	"	P-9	SG 2 INLET		"	"	"
10	"	P-10	SG 2 OUTLET		"	"	"
11	"	P-11	P 2 PUMP DELIVERY		"	"	"
12	"	P-12	PRESSURIZER		"	"	"
13	"	P-13	SG SHELL SIDE		"	"	"
14	DIFF. PRESS.	D-1	PV TOP-BOTTOM	HIGH DIFF-PRESSURE TRANSDUCER	PMS-1OKTM-100H	0-60 Kg/cm ² , 0-±5V	± 1.0 %
15	"	D-2	PV TOP-BOTTOM		ECH	0-0.6 Kg/cm ² , 2-10V	
16	"	D-3	PV. TOP-NO.1 ORIFICE		ETIDM-SP	0-10 Kg/cm ² , "	
17	"	D-4	PV. BOTTOM-NO.2 ORIFICE		"	"	
18	"	D-5	SG 1 INLET-OUTLET		"	-5-+5 Kg/cm ² , "	
19	"	D-6	SG 2 INLET-OUTLET		"	"	
20	"	D-7	P 1 PUMP DELIVERY-SUCTION		"	"	
21	"	D-8	P 2 PUMP DELIVERY-SUCTION		"	-3-+3 Kg/cm ² , "	
22	FLOW RATE	F-1	CONDENSATE NO.1	ELECTROMAGNETIC FLOW RATE METER 6159	0-15 m ³ /min.	± 1.4 %	
23	"	F-2	CONDENSATE NO.2		"		"
24	"	F-3	COOLING WATER NO.1	TURBINE FLOW RATE METER	0-20 l/min.	± 1.2 %	
25	"	F-4	COOLING WATER NO.2		"		"
26	"	F-5	HPCI (1)		"		"
27	"	F-6	" (2)		"		"
28	"	F-7	" (3)		"		"
29	"	F-8	" (4)		"		"
30	"	F-9	ACC 1		"		"
31	"	F-10	ACC 2 (1)	"	0-300 l/min.	"	
32	"	F-11	ACC 2 (2)	"	0-1000 l/min.	"	
33	"	F-12	LPCI (1)	"	0-110 l/min.	"	
34	"	F-13	" (2)	"	0-300 l/min.	"	
35	POWER	W-1	HIGH FLUX RODS	POWER TRANSDUCER 2885	0-600KVA, 0-10V	± 1.0 %	
36	"	W-2	LOW FLUX RODS	"	0-1800KVA		
37	TEMP.(FUEL)	TF-1	NO.1 POSITION 1	THEMOCOUPLE CA UNGROUND	0-800°C, 0-10V	± 1.4 %	
38	"	TF-2	" 2	"	"		
39	"	TF-3	" 3	"	"		
40	"	TF-4	" 4	"	"		
41	"	TF-5	" 5	"	"		
42	"	TF-6	NO.2 POSITION 1	"	"		
43	"	TF-7	" 2	"	"		
44	"	TF-8	" 3	"	"		
45	"	TF-9	" 4	"	"		
46	"	TR-10	" 5	"	"		
47	"	TF-11	NO.3 POSITION 1	"	"		
48	"	TF-12	" 2	"	"		
49	"	TF-13	" 3	"	"		
50	"	TF-14	" 4	"	"		
51	"	TF-15	" 5	"	"		
52	"	TF-16	NO.4 POSITION 1	"	0-400°C, 0-10V		
53	"	TF-17	" 2	"	"		
54	"	TF-18	" 3	"	"		
55	"	TF-19	" 4	"	"		
56	"	TF-20	" 5	"	"		
57	TEMP(SYSTEM)	T-1	PV UPPER PLENUM			± 1.0 %	
58	"	T-2	PV LOWER PLENUM				
59	"	T-3	CONDENSATE NO.1				
60	"	T-4	CONDENSATE NO.2				
61	"	T-5	SG 1 INLET				
62	"	T-6	SG 1 OUTLET				
63	"	T-7	P 1 PUMP DELIVERY				
64	"	T-8	PV INLET NOZZLE				
65	"	T-9	SG 2 INLET				
66	"	T-10	SG 2 OUTLET				
67	"	T-11	P 2 PUMP DELIVERY				
68	"	T-12	PRESSURIZER				
69	"	T-13	SG 1 SHELL OUTLET				
70	"	T-14	SG 2 SHELL OUTLET				
71	REVOLUTION	N-1	P 1 PUMP	TACHO GENERATOR	0-5000 r.p.m., 0-10V	± 1.0 %	
72	"	N-2	P 2 PUMP	"	"		
73	ON-OFF SIGNAL	S-1	RUPTURE DISC NO.1	COPPER WIRE, VOLTAGE GENERATOR	RUPTURE 0-10V		
74	"	S-2	RUPTURE DISC NO.2	"	"		
75	"	S-3	QSV VALVE	LIMIT SW. CONTACT, VOLTAGE GENERATOR	OPEN-CLOSE, 0-10V		
76	"	S-4	RCN VALVE NO.1	"	CLOSE HALF OPEN, 0-10-5V		
77	"	S-5	RCN VALVE NO.2	"	"		
78	"	S-6	ACC 1 VALVE	"	"		
79	"	S-7	ACC 2 VALVE	"	"		
80	"	S-8	SST DISCHARGE VALVE	"	"		
81	"	S-9	P 1 PUMP POWER SUPPLY	ELECTROMAGNETIC CONTACT	CLOSE-OPEN, 0-10V		
82	"	S-10	P 2 PUMP POWER SUPPLY	"	ON-OFF		
83	"	S-11	HPCI VALVE	LIMIT SW. CONTACT	OPEN, CLOSE (VALVE), "		
84	"	S-12	LPCI VALVE	"	"		
85	"	S-13	P 1 PUMP REV. DIREC.	RELAY CONTACT	FORWARD, REVERSE, 0-5V		
86	"	S-14	P 2 PUMP REV. DIREC.	"	"		

For the Test Using No.3 or No.4 Fuel Assembly.

DATA CH.NO	MEAS.ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	ACCURACY	
1	PRESSURE	P-1	PV. UPPER PLENUM	SEMI CONDUCTIVE PRESSUER TRANSDUCER	PMS-10KTM-200H	0~165 kg/cm ² , 0~±5V	± 2.4 %
2	"	P-2	PV. LOWER PLENUM		"	"	"
3	"	P-3	ABOVE NO.1 ORIFICE		"	"	"
4	"	P-4	BELOW NO.1 ORIFICE		"	"	"
5	"	P-5	ABOVE NO.2 ORIFICE		"	"	"
6	"	P-6	BELOW NO.2 ORIFICE		"	"	"
7	"	P-7	SG 1 INLET		"	"	"
8	"	P-8	PI PUMP SUCTION		"	"	"
9	"	P-9	SG 2 INLET		"	"	"
10	"	P-10	SG 2 OUTLET		"	"	"
11	"	P-11	P2 PUMP DELIVERY		"	"	"
12	"	P-12	PRESSURIZER		"	"	"
13	"	P-13	SG SHELL SIDE		PMS-10KTM-100H	0~60 kg/cm ² , 0~±5V	"
14	DIFF.PRESS	D-1	PV. TOP-BOTTOM	HIGH DIFF-PRESSURE TRANSDUCER	EDH	0~0.6 kg/cm ² , 2~10V	± 1.0 %
15	"	D-2	PV. TOP-BOTTOM		EI1DM-SP	0~10 kg/cm ² , "	"
16	"	D-3	PV. TOP-NO.1 ORIFICE *		"	"	"
17	"	D-4	PV. BOTTOM-NO.2 ORIFICE *		"	"	"
18	"	D-5	SG 1 INLET-OUTLET		"	-5~+5 kg/cm ² , "	"
19	"	D-6	SG 2 INLET-OUTLET		"	"	"
20	"	D-7	PI PUMP DELIVERY-SUCTION		"	"	"
21	"	D-8	P2 PUMP DELIVERY-SUCTION		"	-3~+3 kg/cm ² , "	"
22	FLOWRATE	F-1	CONDENSATE NO.1	ELECTROMAGNETIC FLOW. RATE METER 6159	"	0~250 kg/sec	± 1.4 %
23	"	F-2	CONDENSATE NO.2		"	"	"
24	"	F-3	COOLING WATER NO.1		"	"	"
25	"	F-4	COOLING WATER NO.2		"	"	"
26	"	F-5	HPC1 (1)	TURBINE FLOW RATE METER	"	0~20 1/min, 0~10V	± 1.2 %
27	"	F-6	" (2)		"	"	"
28	"	F-7	" (3)		"	0~50 1/min, "	"
29	"	F-8	" (4)		"	"	"
30	"	F-9	ACC 1		"	0~300 1/min, "	"
31	"	F-10	ACC 2 (1)		"	0~1000 1/min, "	"
32	"	F-11	ACC 2 (2)		"	"	"
33	"	F-12	LPC 1 (1)		"	0~110 1/min, "	"
34	"	F-13	" (2)		"	0~300 1/min, "	"
35	POWER	W-1	HIGH FLUX RODS		POWER TRANSDUCER 2885	"	0~600KVA, 0~10V
36	"	W-2	LOW FLUX RODS	"	"	0~1800KVA, 0~10V	"
37	TEMP(FUEL)	TF-1	HIGH FLUX NO.1 ROD	THERMOCOUPLE C/A UNGROUND	"	0~1200°C, 0~10V	± 1.4 %
38	"	TF-2	" " 2		"	"	"
39	"	TF-3	" " 3		"	"	"
40	"	TF-4	" " 4		"	"	"
41	"	TF-5	" " 5		"	"	"
42	"	TF-6	" NO.3 ROD 1		"	"	"
43	"	TF-7	" " 2		"	"	"
44	"	TF-8	" " 3		"	"	"
45	"	TF-9	" " 4		"	"	"
46	"	TF-10	" " 5		"	"	"
47	"	TF-11	" NO.9 ROD 1		"	"	"
48	"	TF-12	" " 2		"	"	"
49	"	TF-13	" " 3		"	"	"
50	"	TF-14	" " 4		"	"	"
51	"	TF-15	" " 5		"	"	"
52	"	TF-16	LOW FLUX NO.12 ROD 1		"	"	"
53	"	TF-17	" " 2		"	"	"
54	"	TF-18	" " 3		"	"	"
55	"	TF-19	" " 4		"	"	"
56	"	TF-20	" " 5		"	"	"
57	"	TF-21	" NO.41 ROD 1		"	"	"
58	"	TF-22	" " 2		"	"	"
59	"	TF-23	" " 3		"	"	"
60	"	TF-24	" " 4		"	"	"
61	"	TF-25	" " 5		"	"	"
62	"	TF-26	" NO.111 ROD 1		"	"	"
63	"	TF-27	" " 2		"	"	"
64	"	TF-28	" " 3		"	"	"
65	"	TF-29	" " 4		"	"	"
66	"	TF-30	" " 5		"	"	"

DATA CH. NO.	MEAS. ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	ACCURACY
67	TEMP. (FUEL)	TF-31	INNER SURFACE 1	THERMOCOUPLE C/A UNGROUND	0~1200°C, 0~10V	± 1.4%
68	"	TF-32	" 2	"	"	"
69	"	TF-33	" 3	"	"	"
70	"	TF-34	" 4	"	"	"
71	"	TF-35	" 5	"	"	"
72	TEMP. (SYSTEM)	T-1	PV. UPPER PLENUM	"	0~400°C, 0~10V	± 1.0%
73	"	T-2	PV. LOWER PLENUM	"	"	"
74	"	T-3	CONDENSATE NO. 1	"	"	"
75	"	T-4	CONDENSATE NO. 2	"	"	"
76	"	T-5	SG 1 INLET	"	"	"
77	"	T-6	SG 1 OUTLET	"	"	"
78	"	T-7	P1 PUMP DELIVERY	"	"	"
79	"	T-8	PV INLET NOZZLE	"	"	"
80	"	T-9	SG 2 INLET	"	"	"
81	"	T-10	SG 2 OUTLET	"	"	"
82	"	T-11	P2 PUMP DELIVERY	"	"	"
83	"	T-12	PRESSURIZER	"	"	"
84	"	T-13	SG 1 SHELL OUTLET	"	"	"
85	"	T-14	SG 2 SHELL OUTLET	"	"	"
86	ON-OFF SIGNAL	S-1	RUPTURE DISC NO. 1	COPPER WIRE, VOLTAGE GENERATOR	RUPTURE, 0~10V	"
87	"	S-2	RUPTURE DISC NO. 2	"	"	"
88	"	S-3	QUICK SHUT VALVE	LIMIT SW. CONTACT, VOLTAGE GENERATOR	OPEN-CLOSE, 0~10V	"
89	"	S-4	RCN VALVE NO. 1	"	CLOSE-HALF-OPEN, 0~10V	"
90	"	S-5	RCN VALVE NO. 2	"	"	"
91	"	S-6	ACC 1 VALVE	"	"	"
92	"	S-7	ACC 2 VALVE	"	CLOSE-OPEN, 0~10V	"
93	"	S-8	HPC 1 VALVE	"	"	"
94	"	S-9	LPC 1 VALVE	"	"	"
95	"	S-10	SST DISCHARGE VALVE	"	CLOSE-OPEN, 0~10V	"
96	"	S-11	P1 PUMP POWER SUPPLY	ELECTROMAGNETIC	ON-OFF, 0~10V	"
97	"	S-12	P2 PUMP POWER SUPPLY	CONTACT	"	"
98	FLOW DIRECTION	FD-1	IN CORE	"	+0, -10V, 0-10V	"
99	"	FD-2	"	"	"	"
100	"	FD-3	"	"	"	"
101	PUMP REVOLUTION	N-1	P1 PUMP	TACHO GENERATOR	0~5000 r.p.m., 0~10V	"
102	"	N-2	P2 PUMP	"	"	"
103	CORE FLOW VELOCITY	F-14	IN CORE	ELECTROMAGNETIC FLOW RATE METER	0~10 ³ sec, 0~10V	"
104	VOID FRACTION	V-1	IN CORE	ELECTRIC RESISTANCE	ON-OFF, 10V-0	"
105						
106						
107						
108						
109						
110						
111						
112						
113						
114						
115						
116						

Note * will be changed for hot leg break piping



- TF Fuel Temperature
 T Temperature
 P Pressure
 W Electric Power
 S Electric Signal
 D Diff. Pressure
 F Flow Rate
 N Rev. Number
 V Void
 FD Flow Direction

Location of Sensors

Fig. 3 Measurement Location for ECCS Test

Table 2 ROSA-II Test Items and Parameters

I. Parametric Test	
1. Effect of Core Heating and ECC on Blowdown	Core Heating "ON"/"OFF,"ECC "YES"/"NO"
2. Fuel Temp. Behavior with Cooling by ECC Water	Single Ended Break + Closed End Side Injection
3. Flow Path of ECC Water	Broken / Unbroken Loop Injection
4. Effect of SG Heat Removal	Secondary Loop Close / Blow
5. Separate Effect of ECCS	Coupled / One Excepted / Individual All "NO" Operation, Injection Location
6. Effect of Break Location	Hot Leg / Cold Leg / Pump Suction Side
7. Effect of Break Size	Orifice Dia., Double Ended / Single Ended / Distributed / Split Break
8. Effect of Heating Rate (DNB)	Core Heating Power, Scrum Timing
9. Effect of Power Distribution	Uniform / Cos, One / Two Region
10 Effect of Pump Operation	Trip Timing
II. Actual Reactor Plant Simnlated Test	
1. Standard Data of Blowdown	ECCS NO Operation
2. Effectiveness of ECCS	Break Location, Break Size
3. Effectiveness Margin of ECCS	Double Ended / Single Ended / Distributed / Split Break, Break Location, Break Size, Secondary Loop Close / Blow
4. Effect of Reactor Type	
III. Development Test of More Effective ECCS	
1. Effect of Injection Location	
2. Effect of Injection Condition	
3. New Type ECCS	

4. 実験装置

4-1 設計方針

4-1-1 基本方針

ROSA-II 装置を設計するにあたって採用した基本方針は、LOCA時のブローダウン過程及び再冠水の過程において、装置各部の圧力、温度、クオリティ等の時間変化が実炉におけるそれらとなるべく一致するように設計することである。そしてモデルにしたのは、原則として米国WH社のTROJAN炉（以下、実炉と記す。）である。具体的には、

- ① 実炉の一次系主要機器の構成を模擬する。
- ② 定常運転時の圧力、温度を実炉の場合に合わせる。
- ③ 実炉の一次系4ループのうち1つに配管破断が生じたと想定し、健全な3ループを一つにまとめ、流量や蒸気発生器の容量を1:3にした2つのループを設ける。
- ④ 装置各部の容積比を実炉の場合に合わせる。
- ⑤ 主要機器の設置高さの関係をなるべく実炉に合わせる。
- ⑥ 炉心流速を実炉に合わせたと仮定した時に生じる各部の圧力損失を実炉に合わせる。
- ⑦ 放出開始前の各部のエンタルピ分布を実炉に合わせる。具体的には炉心温度差、蒸気発生器の出入口温度差を合わせる。
- ⑧ 炉心内模擬燃料棒の直径、ピッチ、配列及び熱出力を実炉に合わせる。
- ⑨ ECC水を実炉と同等以上の圧力、温度、流量条件で、圧力容器内、健全ループと破断ループの高温側と低温側それぞれに注入できる。
- ⑩ 両端（ギロチン）破断、部分（スプリット）破断、面積配分両端破断、及び片側破断の破断形式を模擬できる。また破断位置を、高温側配管、ポンプ吸込側配管、低温側配管のいずれかに設定できる。最大破断口径は、実炉の最大口径破断のブローダウン時間を下まわれるようにする。

等の方針がとられた。電源設備の容量や装置設置場所の制約条件、製作上の困難もあったが、できるだけROSA-II試験目的に沿うようにした。しかし、装置の大きさ、一次系の構造材熱容量と冷却材熱容量との比、一次系の構造材表面積と冷却材容積との比、ダウンカマの間隙と軸長、燃料棒の熱容量と熱伝導率、グリッドとスペーサー等の形状と寸法、破断直前の炉心流速、ポンプの減衰特性等を実炉条件に合わせるといことは、基本方針にはとり入れることができなかった。なお、試験装置には、温度、圧力、流量、ボイド率、流れ方向等を測定する計測器具を取りつけようようにした。

4-1-2 各論

(1) 運転条件

破断前における運転圧力、圧力容器出口温度をそれぞれ160 kg/cm²G、325°Cにした。出力については、電源の制約上最高2240 KWになり、これで模擬燃料棒109本を加熱する。定常運転時における出力、炉心出入口温度差、系の全流量との関係をFig. 4~6に示す。ここでTongの式によると、最大熱負荷で標準流量においても、また実炉と炉心出入口温度差を合わせた流量条件においても、定常運転でDNBは生じない。

(2) 模擬炉心

最高出力2240 KWで実炉の最高熱流束と同じ熱流束の模擬燃料棒を使うことにすると、発

熱長 1.5 m で 27 本しか入らないことになる。ところで、模擬燃料棒の発熱密度は少くとも崩壊熱を模擬できるだけの必要であり、計測燃料棒では運転時の発熱をも模擬したい。一方、LOCA 時の炉心流動、伝熱の模擬の観点から、模擬燃料棒の軸長はできるだけ実炉のそれに近づけたいし、かつ炉心の一部分しか発熱しないというのは望ましくない。以上の要件の妥協点として、一次燃料の仕様を次のように決めた。炉心全軸長 2000 mm, 発熱長 1500 mm, 模擬燃料棒本数 109 本。このうち、実炉条件を上まわる熱負荷（最大熱負荷 61.6 KW/m, 最大熱流束 1.58×10^6 kcal/h · m²）の模擬燃料棒が 6 本（うち 3 本は計測用）、低熱負荷の模擬燃料棒（最大熱負荷 12.5 KW/m, 最大熱流束 3.6×10^5 (kcal/h · m²)) が 90 本、残り 13 本が非発熱タイロッド（うち 1 本は計測用）である。模擬燃料棒の直径、ピッチ、配列については、実炉と同じ条件にし、その熱出力は、崩壊熱や遅発中性子等を模擬した関数制御できるよう配慮した。炉心及び圧力容器の流動抵抗を実炉条件に合わせた。なお炉心バイパスは、実炉の炉心上下温度差と圧力容器出入口温度差とから計算して、炉心部流量の 1/20 以下の量が流れるとした。

(3) 圧力容器

圧力容器の使用条件は 160 atg, 325 °C である。圧力容器内の内径は、ダウンカマーと炉心の容積比が実炉に合うように決めた。上下プレナム部は、フランジに炉心加熱用の電流導入部が装着できるよう、太くした。

胴部内径	280 mmφ
プレナム部内径	380 mmφ
内面軸長	4855 mm

一次系冷却水の出入口ノズルは、実炉と同じく同一レベルにした。

(4) 一次冷却系

循環流量は標準で 1860 ℓ/min であり、最高出力の場合にはこれで炉心出入口温度差が 17 °C になる。この流量は破断ループと循環ループとに、1:3 の割合で分かれて流れる。

破断ループ流量	460 ℓ/min
健全ループ流量	1400 ℓ/min

この時炉心重量速度は、 4.3×10^6 kg/m² · h (1.6 m/sec) となり、実炉の約 1/3 である。しかし Tong の式によれば DNB R に対して十分余裕があるので、放出前に模擬燃料棒を焼損することなく実験を行いうる。蒸気発生器の一次側の形状は縦形 U 字管群とし、その性能は、実炉を模擬して一次側入口温度 325 °C, 二次側出口温度を 275 °C とし、除熱能力は電源容量を考慮して 2900 KW とした。蒸気発生器及び配管の流動抵抗は基本方針⑥によったが、流動抵抗の不足分を、特性が流れ方向によらない丸形オリフィスをつけて補った。Fig. 7 に、ROSA-II の流動抵抗の設計値を TROJAN 炉のそれと共に示す。

(5) 非常炉心冷却系 (ECCS)

実炉と同様、蓄圧器 (ACC), 高圧注入系 (HPCI), 低圧注入系 (LPCI) を備え、破断・健全ループのそれぞれ高温側配管と低温側配管、及び上下部プレナム、ダウンカマー 2 箇所、計 8 箇所のうち任意の場所に注入できるようにした。ACC の容積は、健全ループ側の ACC 2 だけで炉心の半分まで浸しうるようにし、実際には更にその 2 倍の値にした。ACC 1 の容量は ACC 2 の 1/3 にした。HPCI タンクからは最大流量 60 ℓ/min で 5 分間注水可能で

ある。LPCI タンクからは最大流量 290 l/min で3分間注水可能であり、これらによって再冠水速度を実炉の値 (6.3 cm/sec) の2倍までとれるようにした。

(6) 急速放出系及び急速凝縮器

160 atg , 325°C の使用条件から瞬間的に配管の一部を破断させ冷却材を放出させると、破断機構には大きな力がかかるので、その部分を固定しておく。破断位置を変えた実験は、破断ループの配管を交換することによって行う。放出される管内高速二相流に、周囲から冷水を噴出させ急速凝縮を行うと同時に、流出した冷却材流量の測定を行うことを目的にして急速凝縮器が放出部につけられている。

ここでは、高速二相流と冷水との混合をより有効にするために、流出流量に応じて混合部の流路断面積と冷水吹込量を変えられることが必要である。なお、破断タイミングと冷水の吹込タイミングが適当に調節できること、及び凝縮を完結できるよう、放出管末端に適当なオリフィスを設け混合部の圧力を上げることが必要である。

放出系は両端、配分破断の可能な様に2系統設ける。

破断位置、破断形式は基本方針⑩による。破断時刻と遮断弁の作動時刻及び作動所要時間は任意に調節できるようにし、様々な破断条件を模擬できるようにする。最大破断口径は、最小ブローダウン時間が実炉の場合より短くなるように、即ち (破断口面積) / (全冷却材容積) が実炉を上まわるように決めた。また種々の破断口径を薄刃オリフィスによって設定する。その口径の値としては、破断面積比が $1:2/3$ の比になる一連の値から次の値を採った。

$37.5 \text{ mm}\phi$, $30.5 \text{ mm}\phi$, $25.0 \text{ mm}\phi$, $20.5 \text{ mm}\phi$,
 $16.5 \text{ mm}\phi$, $11.0 \text{ mm}\phi$, $7.5 \text{ mm}\phi$

なお、最大口径 $37.5 \text{ mm}\phi$ は、実炉の最大破断面積相当の 20% 増しになっている。

4-1-3 TROJAN炉との比較

RÖSA-II 試験装置と米国ウエスチングハウス社のTROJAN炉との基本構成、主要部寸法、各部容積、熱的設計値、ECCS、一次系各部の圧力損失を Table 3~7, Fig. 7 に示す。

4-2 実験装置

4-2-1 概要

Fig. 8 に試験装置のフローシートを示す。本実験装置の構成は実際の原子力発電プラントの主要機器と同様の機能を有するものを配置し、実際のプラントのLOCA時の熱流動現象の予測に役立つことを意図して実験できるように考慮されている。すなわち、原子炉本体に代るものとして模擬炉心を内装した圧力容器 (PV) をおき、通常のPWR型の原子炉本体から循環する冷却材の4系統の内、1系統が破断するものとして、 $3:1$ に流量配分をした健全ループと破断用ループを設けてある。そして、それぞれのループには蒸気発生器 (SG) と循環ポンプ (P) があり、PV炉心で発生する熱をSGにより2次系に伝える。SGで発生した2次系の作業蒸気は実際のプラントではタービンにより発電機を動作させることに消費されるが、本実験装置では、2次系冷却水タンク (SST) において、2次系の圧力を一定に保ちながら大気へ放出される。破断ループには、PV出口→SG1→P1→PV入口の配管中の任意の位置で、配管破断が発生することを想定して、これらの径路のすべての位置に破断を模擬した破断装置とその放出管を取付けられるようになっている。

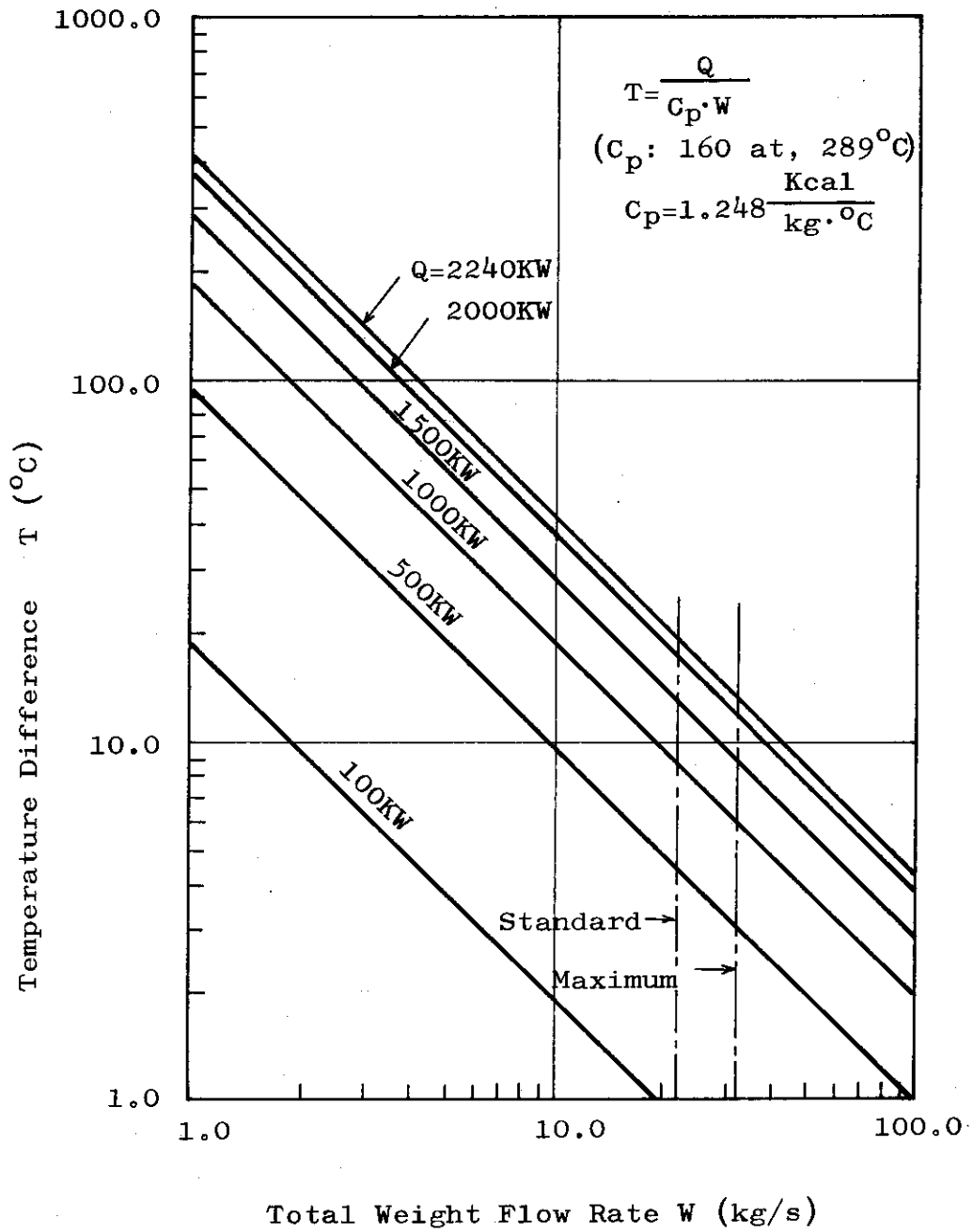


Fig. 4 Range of Core Temperature Difference for Test (1)

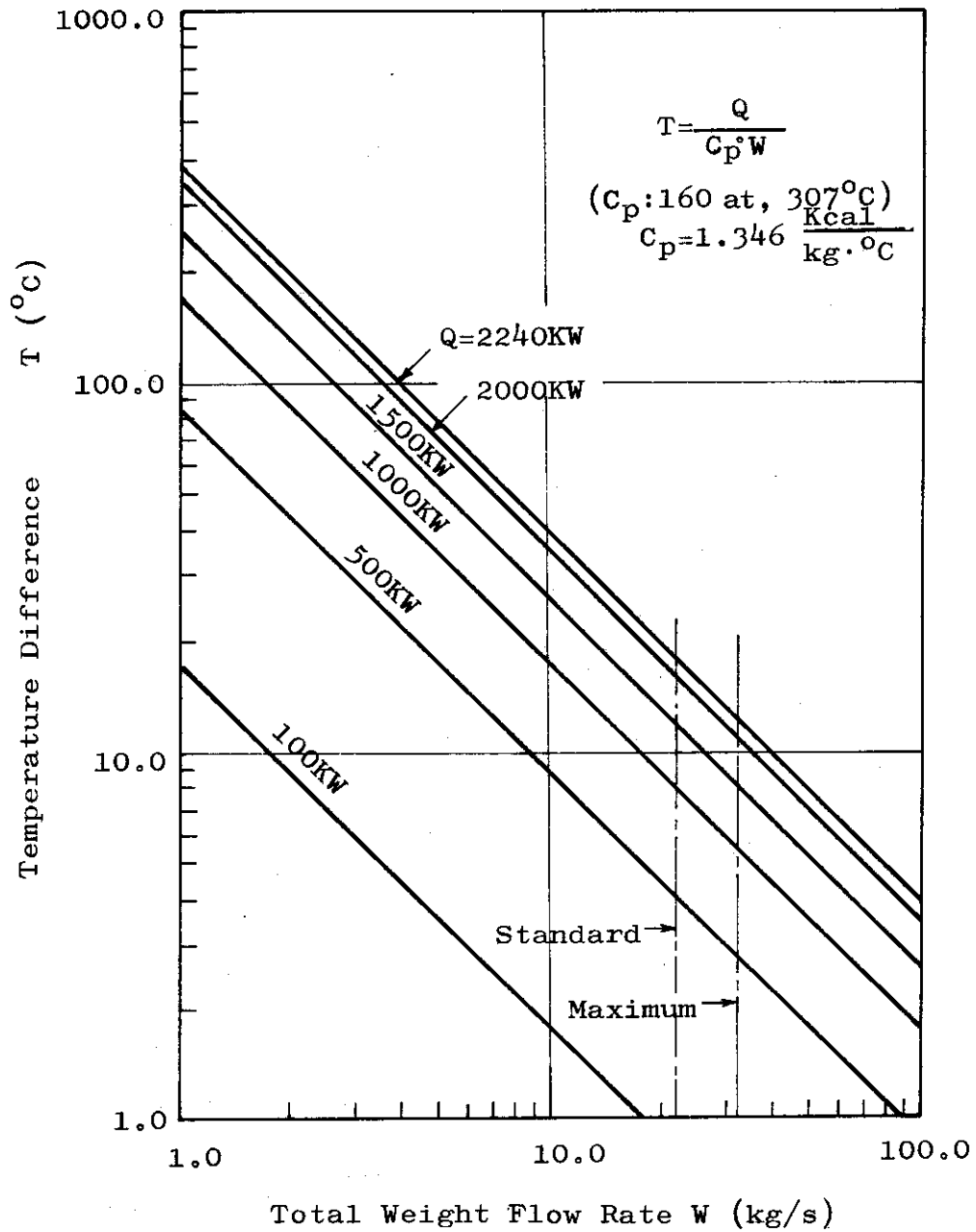


Fig. 5 Range of Core Temperature Difference for Test (2)

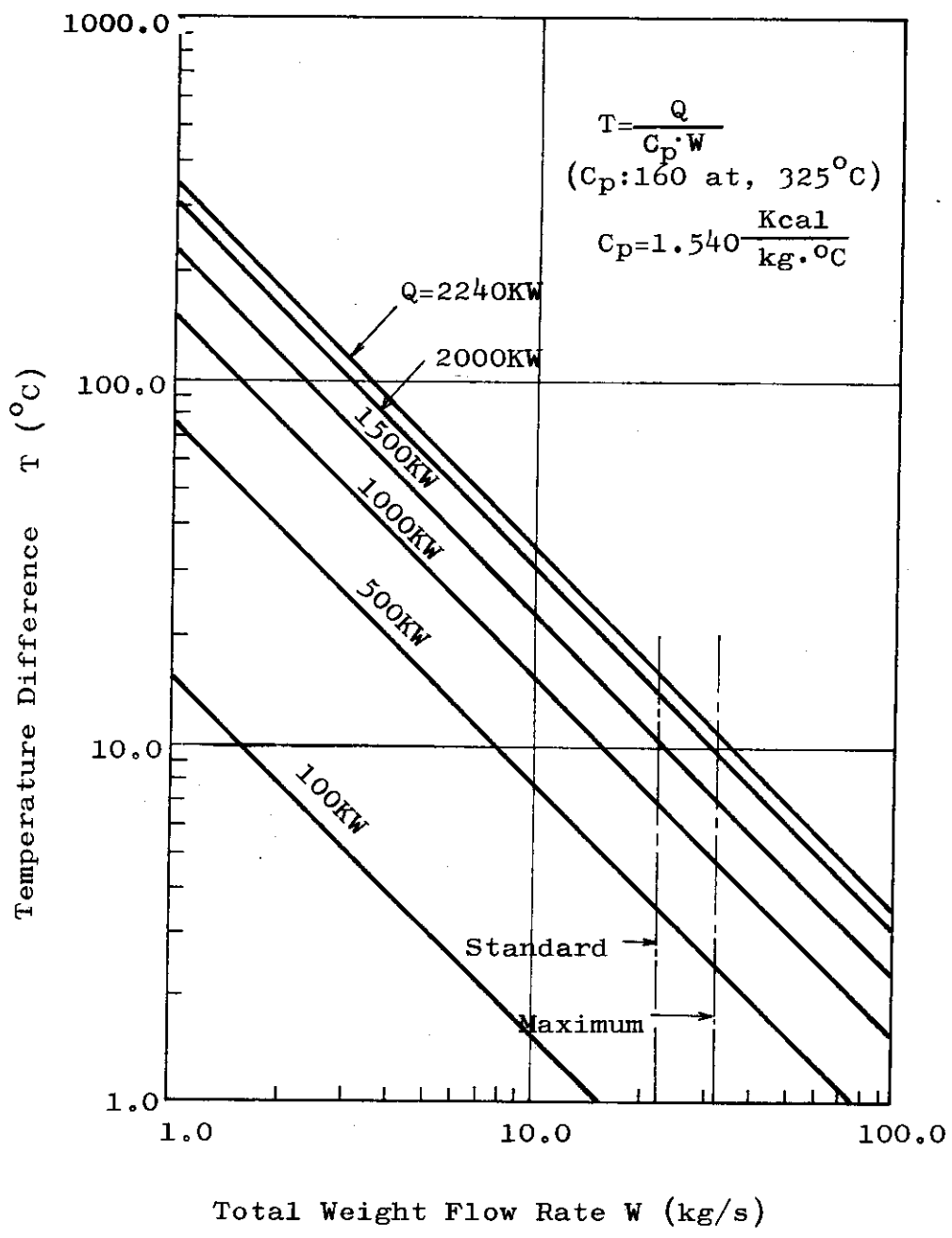


Fig. 6 Range of Core Temperature Difference for Test (3)

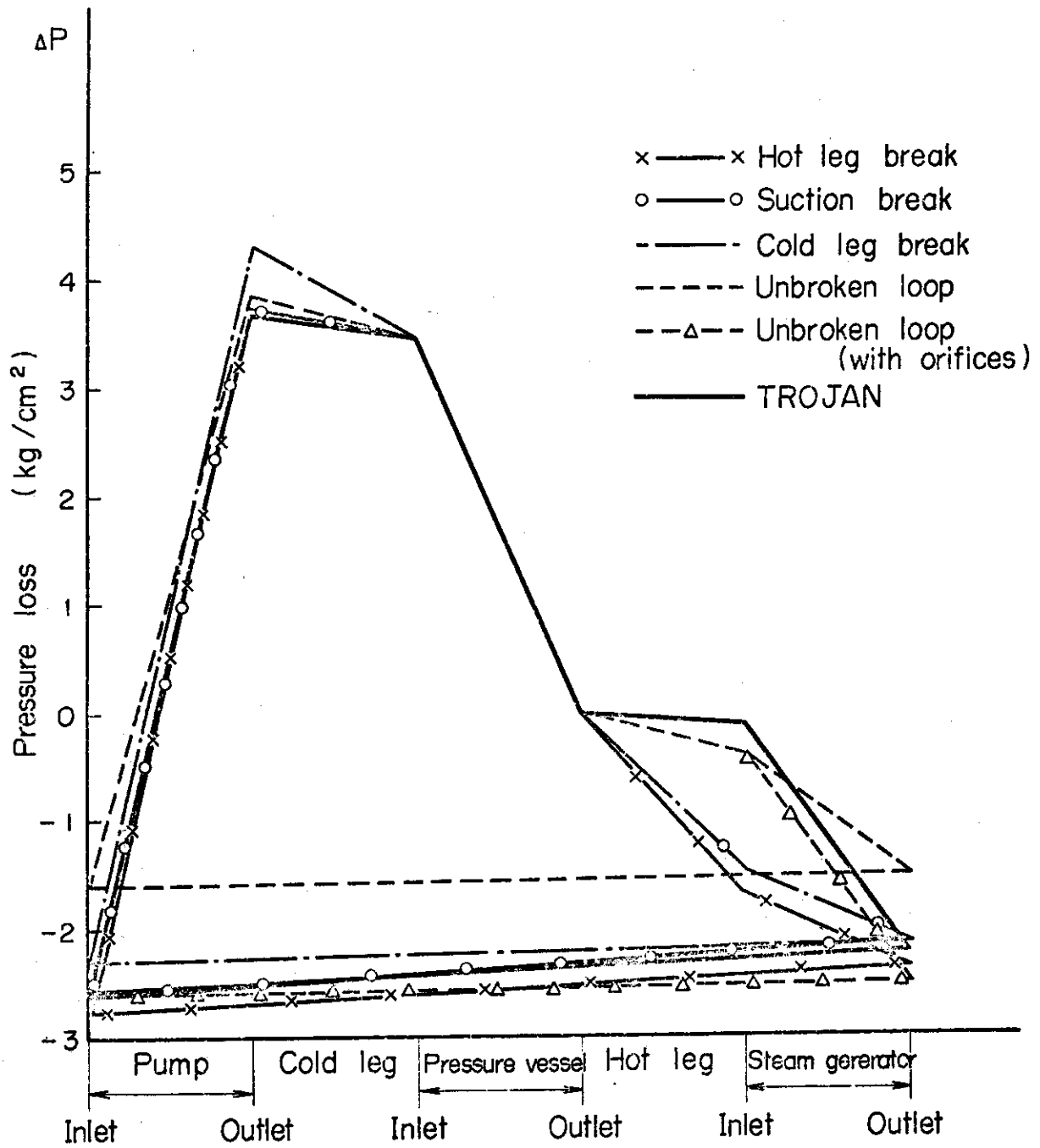


Fig. 7 Comparison of Pressure Loss between the ROSA-II and the TROJAN Reactor with the Same Core Flow Velocity

Table 3 Design Data of the ROSA-II and the TROJAN Reactor

Comparison of Major Design Parameters		
	ROSA - II	TROJAN
Reactor type	Simulated PWR (changeable to a simulated BWR)	PWR
Number of primary loops	2 (ratio of the volume and the flow rate, 1=3)	4
Number of steam - generators	2 (ratio of the volume and the heat removal, 1=3)	4
Secondary cooling system	Pressurized open loop	Recirculating closed loop
Emergency core cooling system (ECCS)	<ul style="list-style-type: none"> · High-pressure coolant injection system (HPCI) · Accumulator (ACC) · Low-pressure coolant injection system (LPCI) 	<ul style="list-style-type: none"> · High-pressure coolant injection system (SIS) · Accumulator (ACC) · Low-pressure coolant injection system (RHRS) · Super-high pressure coolant injection system (CCP)
Core heatup	Electrically heated rods	Nuclear fuel rods
Core power (KW)	below 2240	3,411,000
Total volume of primary system (m ³) (including steam volume in pressurizer)	0.854	355
Primary system pressure (kg/cm ² ·g)	below 160	158 (nominal value)
Primary system temperature (°C)	below 325	325 (hot side) 289 (cold side)
Secondary system pressure (kg/cm ² ·g)	below 60	64
Secondary system entrance temperature (°C)	below 275	227
Secondary system exit temperature (°C)	below 275	279

Table 4 Dimensions of Major Components of the ROSA-II and the TROJAN Reactor

Dimensions of Major Components		
	ROSA - II	TROJAN
Pressure vessel		
Inner height (m)	4.855	12.6
Inner diameter (m)	{ 0.38 (top) 0.28 (middle) 0.38 (bottom)	4.39
Nozzle elevation of the primary loop (m)	3.655	8.3
Core		
Core length (m)	2.0	4.06
Fuel rod heating length (m)	1.5	3.66
Fuel rod outer diameter (mm)	10.7	10.7
Fuel rod pitch (mm)	14.3	14.3
Cladding thickness (mm)	1.3	0.61
Core barrel inner diameter (m)	0.23	3.74
Primary loop pipe		
Inner diameter (cm) at pressure vessel inlet	{ 5.73 (blowdown loop) 8.73 (unbroken loop)	70.0
at pressure vessel outlet	{ 4.31 (blowdown loop) 10.80 (unbroken loop)	73.7
Primary loop total length (m) (except the steam generators and the pumps)	{ 14.9~15.8 (blowdown loop) 12.7 (unbroken loop)	(unknown)
Steam generator		
Inner height (m)	{ 3.6 (blowdown loop) 4.5 (unbroken loop)	22.4
U-tube inner diameter (mm)	14.4	19.7
U-tube outer diameter (mm)	19.0	22.2
U-tube mean length (m)	{ 4.97 (blowdown loop) 6.45 (unbroken loop)	(unknown)
Inner diameter (m)	{ 0.35 (blowdown loop) 0.50 (unbroken loop)	(unknown)
Pressurizer inner height (m)	2.55	15

Table 5 Volume Distribution of the ROSA-II and the TROJAN Reactor

Volume Distribution		
	ROSA - II	TROJAN
Pressure vessel (m ³) (with all internals)	0.292	132
Steam generators (m ³)	0.298 (0.073 + 0.225)	122 (30.6 x 4)
Pressurizer (m ³)	0.133	5.1 (including steam 20.4)
Primary loops (m ³) (including the pumps & the surpline)	0.131 (0.034 + 0.097)	44.9
Total volume of the primary system (m ³)	0.854	355
Inside of the pressure vessel (I)	%	%
Upper plenum (m ³)	0.117 (40.0)	
Core (m ³)	0.051 ^{**} (17.5)	19.3* (14.6)
Lower plenum (m ³)	0.050 (17.1)	
Downcomer (m ³)	0.074 (25.4)	
Inside of the pressure vessel (II)	%	%
Below the lower end of the core (m ³)	0.071 (27.3)	29.2 (22.3)
Below the upper end of the core (m ³)	0.163 (55.7)	63.9 (49.1)
Below the center of the primary loop nozzle (m ³)	0.184 (63.0)	89.2 (68.6)
Secondary side of the steam generators (m ³)	0.64 (0.19 + 0.45)	355
<p>* Defined as effective flow area X the length of fuel rod assembly ** Defined as the volume between the lower and the upper grids including the bypass</p>		

Table 6 Thermal Design Data of the ROSA-II and the TROJAN Reactor

Thermal Design Data		Thermal Design Data (cont'd)	
	ROSA-II	ROSA-II	TROJAN
Core power	below 2240	4.83	4,850
Average rod power (kw/m)	below 62 (high heat flux rod)	4.53 (low heat flux rod) 0.30 (high heat flux rod)	289
Max. rod power	below 12.5 (low heat flux rod)	below 325	37.2
Average heat flux (Kcal/m ² h)	1.58x10 ⁶ (high heat flux rod)	17 (at max. power & nominal flow rate)	35.7
Max. heat flux (W/cm ²)	(1184)		
	0.36x10 ⁶ (low heat flux rod)		
	(42)		
Number of heated rods	6 (high heat flux rod) 90 (low heat flux rod)		
Number of unheated rods	13	573 800	
Min. DNBR	arbitrary		
Total flow rate (ℓ/min)	~ 2,700	2.95 (blow down loop) 3.84 (unbroken loop) 5.21 (blow down loop) 2.52 (unbroken loop) (all at nominal flow rate)	3.19 3.99
(nominal value)	(1,860)		
Total mass flow rate (kg/min)	~ 2,000		
(nominal value)	(1,330)		
Effective core mass flow (kg/min)	~ 1,800		
(nominal value)	(1,200)		
Average mass velocity (kg/m ² h)	~ 6.5x10 ⁶		
(nominal value)	(4.3x10 ⁶)		
Average core flow rate (m/s)	~ 2.4		
(nominal value)	(1.6)		
Effective flow area (m ²)	0.0185		
		51 (blow down loop) 123 (unbroken loop) 15.1 (blow down loop) 47.3 (unbroken loop) below 275 below 275 ~ 300	3,388 x 4 4,780 x 4 227 279 75,000 x 2
Heating surface area in the core (m ²)			
Coolant temp. at the inlet (°C)			
Coolant temp. difference across the core (°C)			
Pressure vessel			
Coolant temp. difference across the pressure vessel (°C)			
Flow rate to achieve the same temp. difference as that in the TROJAN reactor (kg/min) (ℓ/min)			
Coolant velocity in pipe (m/s)			
pressure vessel inlet			
pressure vessel outlet			
Steam generator			
Number of U tubes			
Heating surface area (m ²)			
Secondary coolant inlet temp. (°C)			
Secondary coolant outlet temp. (°C)			
Secondary coolant flow rate (ℓ/min)			

Table 7 Emergency Core Cooling System of the ROSA-II and the TROJAN Reactor

Emergency Core Cooling System		
	ROSA - II	TROJAN
High pressure coolant injection system	{ Hot leg Cold leg	{ Hot leg Cold leg (super high pressure system)
Injection location	Pressure vessel : top, middle & bottom	
Number of systems	1 (separable)	2
Injection pressure (kg/cm ² g.)	below 130	below 105
Injection rate (ℓ/min)	below 60	below 2,460
Water temperature (°C)	below 165	3 ~ 32
Source of supply	Hot water tank (300 ℓ, 7 kg/cm ² g.)	Refueling water tank (1,300 m ³)
Low pressure coolant injection system	{ Hot leg Cold leg	
Injection location	Pressure vessel : top, middle & bottom	Hot leg
Number of systems	1 (separable)	2
Injection pressure (kg/cm ² g.)	below 22.6	below 15
Injection rate (ℓ/min)	below 290	below 24,200
Water temperature (°C)	below 100	3 ~ 32
Source of supply	Hot water tank (1,500 ℓ)	Refueling water tank (1,300 m ³)
Accumulator	{ Hot leg Cold leg	
Injection location	Pressure vessel : top, middle & bottom	Cold leg
Injection pressure (kg/cm g.)	below 70	45.7
Water temperature (°C)	below 100	10 ~ 65
Volume (m ³)	0.23 (blow down loop) 0.67 (unbroken loop)	38 (water 24 nitrogen 14)

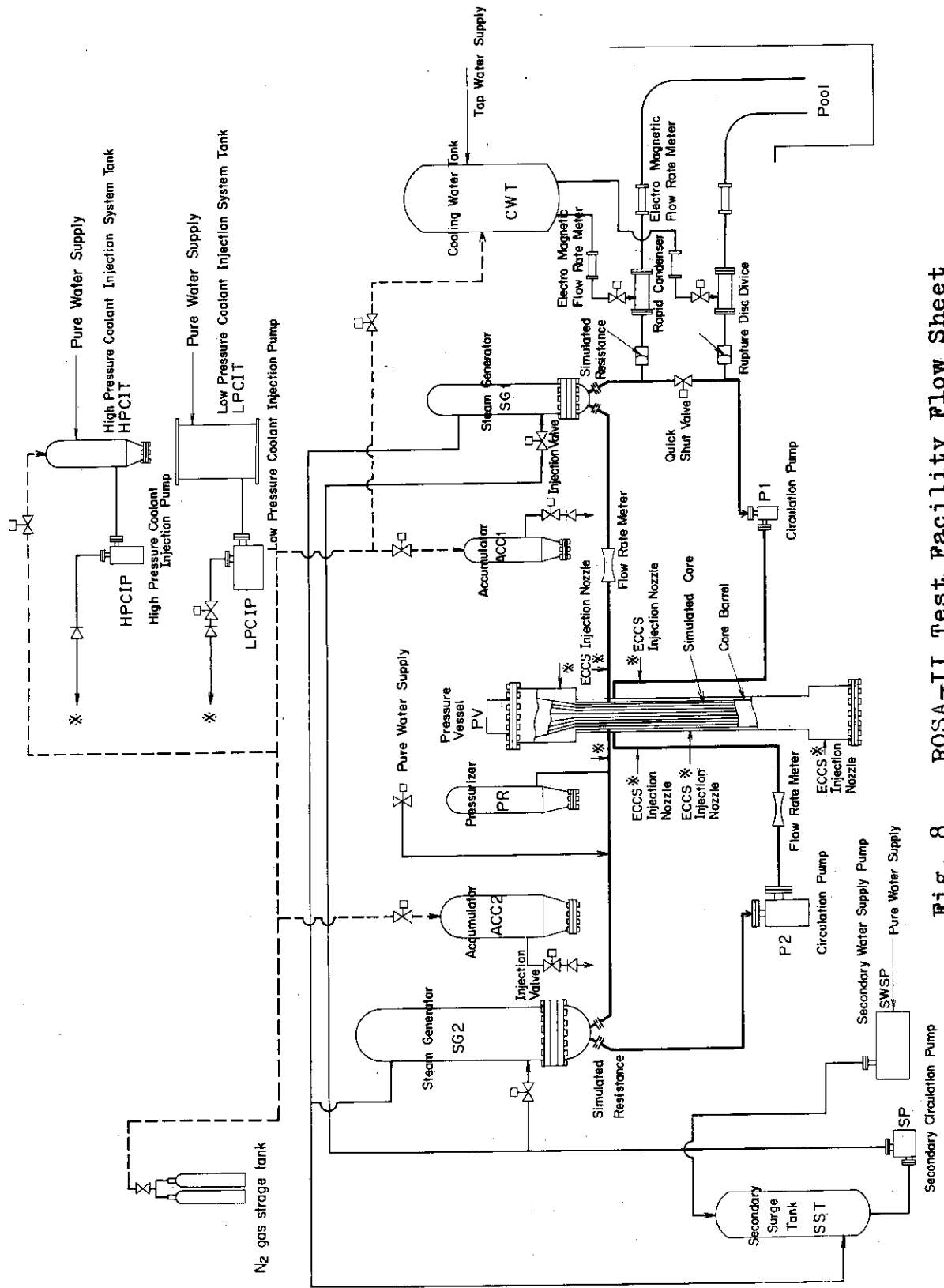


Fig. 8 ROSA-II Test Facility Flow Sheet

放出管は配管の全口径破断を想定して2系統あり、それぞれに急速凝縮器が設けられている。これは、放出管中を流れる超音速の蒸気-水二相流の流量を測定するために、二相流の蒸気部分を凝縮させ、水単相流とする装置である。凝縮器の下流の水単相流部分に電磁流量計が設けてある。凝縮用に吹きこまれる冷却水量とその温度ならびにこれと混合して凝縮した水単相流の流量とその温度を測定することにより、破断箇所より放出する流量とそのエンタルピを求めることができる。なお、放出する蒸気-水二相流は、破断箇所を通過する時点で、二相臨界流となるので、それ以後の放出管中では超音速流となる。したがって、これを凝縮させ、管断面全体を水が充たした水単相流とするためには、二相流の有する運動量を小さくするだけの抵抗を設け、圧力を上げる必要がある。そのために、放出管出口にオリフィスを設けてある。

ECCSは健全ループおよび破断ループのそれぞれの高圧側配管(PV出口とSG入口の間の配管)と低温側配管(P1出口よりPV入口までの配管)ならびにPV上部、下部プレナム、およびダウンカム内2箇所の合計8箇所のうちの任意の位置にHPCI、ACC、LPCIの3種類のECCSを接続できる。

HPCIは、冷却材放出過程において一次系が、まだ高圧のときにHPCIポンプによって注水され、一次系の圧力を下げて冷却材の放出をなるべく抑える目的で設置されている。LPCIは、一次系が低圧になったときにLPCIポンプによって注水され、炉心内に水を充満させることを目的として設置されている。ACCは、これら2つのECCS系の間圧力で作動するもので、あらかじめ圧力を高められた蓄圧タンクから、一次系との圧力差に応じて、逆止弁を通過して自動的に一次系に注水されるものであり、健全ループ、破断ループのそれぞれに独立して設けられている。一次系圧力を制御する加圧器は健全ループの高圧側配管途中に接続されている。

試験装置内の挙動を測定する計測系には、圧力、温度、差圧、流量などがあり、Fig. 3のフローシート上に示された点について動的に測定される。これらのデータはデータ集録装置に集録され、任意の時期にプロッターによるグラフに再生できるようになっている。さらに、本試験装置の昇温昇圧過程での監視用としてFig. 9プロセス計測用フローシートに示される点において計測される。

電源は3相、420V、560KVAのものと、3相、50V、1680KVAのものが用意されており、IVRあるいはサイリスタによって制御される。ただし、後者は3次模擬燃料集合体以降で電圧を420Vとする。

試験装置の運転手順は概略次のようである。まず、試験装置内の各機器の健全性を確認したのち、純水を試験装置の一次系ならびに2次系に給水する。各系への給水用往復動式ポンプにより一次系内は約165 kg/cm²g、二次系内は約60 kg/cm²gまで昇圧し、耐圧ならびに漏洩テストを行なう。次に、一旦圧力を下げて、水位を設定した後、PRヒーターに通電し、PR内の温度、圧力を上げながら、低熱流束ならびに高熱流束模擬燃料棒に通電し、一次系ならびに二次系の昇温昇圧を行なう。この途中で一次冷却材中に含まれる溶存ガスをぬくために、PV、PRなどの容器の上部から冷却材を放出させる作業を時々行なう。試験装置内の圧力、温度、流量、炉心発熱量等の試験条件が設定されたら、放出試験に入るが、それについては次項で詳しく説明する。

4-2-2 試験方法

試験は前章の目的に沿って項目別に次のような方法がとられる。

(1) 破断方式

破断機構の作動順序の組合せにより Table 8 のような破断方式の種類がある。これらは、ラプチャーディスク破断 (RD 破断) と急速遮断弁 (QSV) ならびに急速凝縮用冷却水注入弁 (AV-8, 9) の作動順序と遅延時間の組合せによってきまるものである。すなわち、QSV をとじてから破断するか、破断後、QSV をとじるか、そのときの凝縮用冷却水はどの時点から注水が始まるかなどの条件がこれによってきめられる。この中には、片側破断も含まれている。

(2) 破断位置

放出系の位置を固定しておき、破断ループの配管を替えることにより

高温側配管系 (PV 出口→SG1)

ポンプ吸込側配管系 (SG1 出口→P1)

低温側配管系 (P1 出口→PV 入口)

の 3 箇所内の任意の 1 箇所で破断させることができる。

(3) ECCS の注入方法

注入時期：ACC を除いて、PR 内圧力がある値まで下がったとき、これを検出して自動的に作動させる方法をとるが、実際の原子炉における ECCS の作動開始の遅れを考慮して、タイマーによる作動遅延時間を設定できる。

注入位置：3 系統の ECCS から健全ループならびに破断ループの高温側配管と低温側配管、PV 上部下部プレナム、ダウンカマー部、2 箇所の合計 8 箇所に注入できる。

これらは ECCS なしの場合とそれぞれ単独の場合ならびにこれらの種々の組合せの場合について作動させることができる。

注入流量ならびに温度：HPCI 系は HPCIT (タンク) 内で循環しながら均一に所定の温度に上げられたものを往復動式の HPCIP (ポンプ) によって、任意に定められたある流量注入することができる。標準の注入流量は、実炉の場合を考慮して、その容積比に比例した量とする。

LPCI 系は LPCIT (タンク) 内で循環しながら均一に所定の温度に上げられたものをプースター付きの遠心ポンプ LPCIP によって、任意に定められたある流量だけ注入する。標準の注入流量は HPCI 系の場合と同様に、実炉との容積比に比例した量とする。

ACC 系は ACC1 タンク (破断ループ用) と ACC2 タンク (健全ループ用) のそれぞれのタンク内で前二者と同様に均一の温度に上げられたものを窒素ガスの圧力により注入する。この場合、タンク内圧力と一次系との差圧に応じて注入される量は変化してゆく。

(4) 破断口径

破断機構部に $7.5 \phi \sim 37.5 \phi$ の薄刃オリフィスを取付けることにより種々の口径に設定することができる。

(5) 炉心発熱量の時間的变化

関数発生装置と遅延タイマーで供給電力を制御することにより、あらかじめ用意された発熱量の変化過程をたどることができる。

発熱量の変化曲線としては、崩壊熱曲線およびそれに遅発中性子による発熱分を付加したものを用意している。

(6) 二次系の影響

Table 8 Break Mode of ROSA-II Break Unit

Mode No.	Sequence
No. 1	Switch ON → AV 8,9 Open → (T1) → QSV Close → (T2) → RD 1,2 Break
No. 2	Switch ON → AV 8,9 Open → (T1) → RD 1,2 Break → (T2) → QSV Close
No. 3	Switch ON → QSV Close → (T1) → RD 1,2 Break → (T2) → AV 8,9 Open
No. 4	Switch ON → QSV Close → (T1) → AV 8,9 Open → (T2) → RD 1,2 Break
No. 5	Switch ON → RD 1,2 Break → (T1) → QSV Close → (T2) → AV 8,9 Open
No. 6	Switch ON → RD 1,2 Break → (T1) → AV 8,9 Open → (T2) → QSV Close
No. 7	Switch ON → AV 8 or 9 Open → (T1) → RD 1 or 2 Break (QSV is held open)
No. 8	Switch ON → RD 1 or 2 Break → (T1) → AV 8 or 9 Open (QSV is held open)

Note 1 : T1 and T2 indicate time delayed relay switches.

Note 2 : No.7 and No.8 simulate split break.

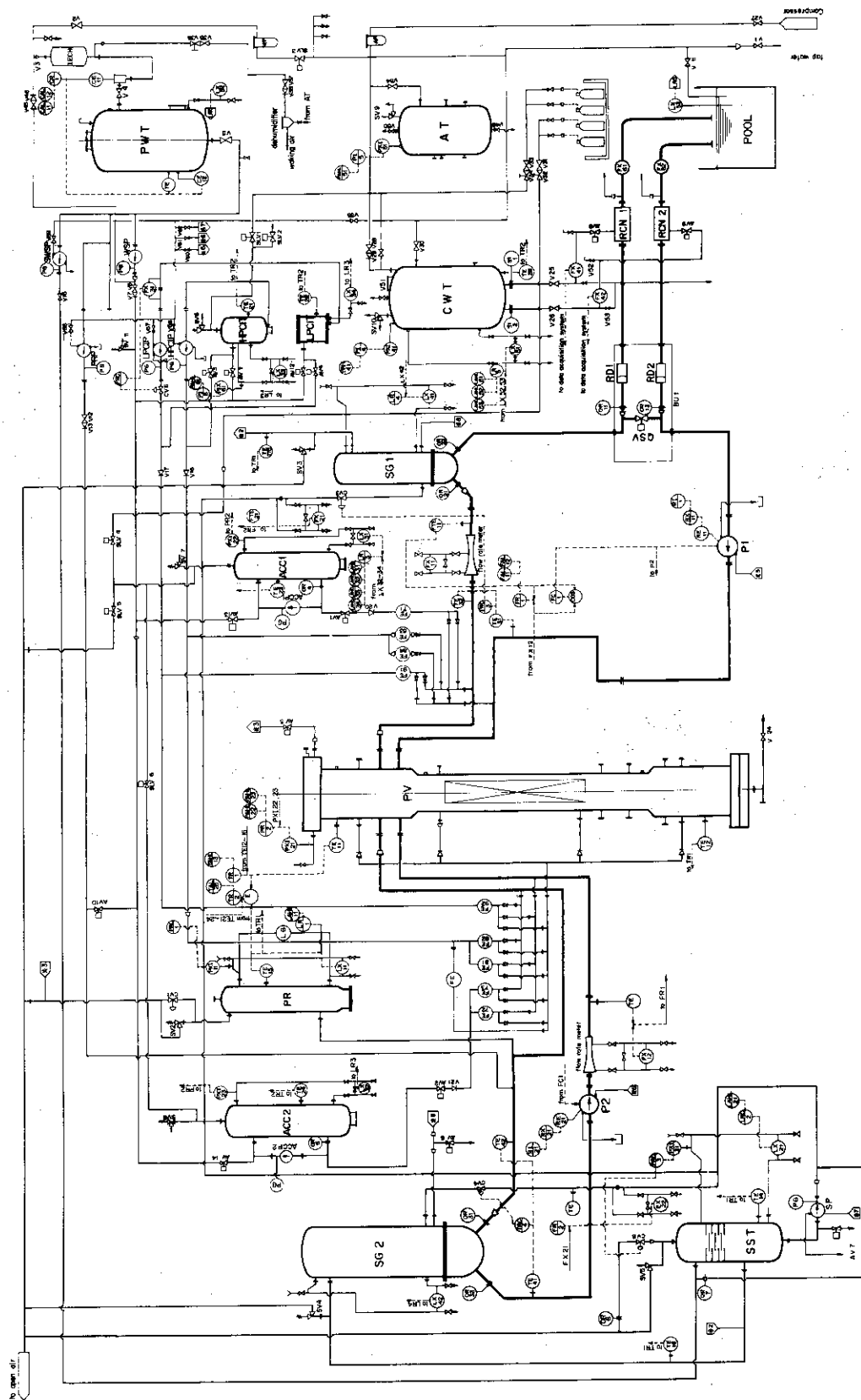


Fig. 9 Measurement Location for the ROSA-II Operation

ブローダウン過程における二次系の影響を調べるために、CV-3, 4によってSGへの二次系の流入量を調節することができ、さらにCV-5とオリフィスによって二次系から大気への放出流量を調節することができる。

(7) 一次系内の温度分布

炉心出入口の温度差は炉心発熱量および一次系の循環流量を一次系循環ポンプの回転数を変えることにより調節できる。

また、一次系の低温側配管内の流体温度は蒸気発生器の二次側の液面を調節することにより二次系への伝熱量を変えて任意の温度に設定できる。

(8) ポンプトリップ

ポンプによる一次系への循環力の影響を調べるためブローダウン発生後にポンプモーターの電源を切る時刻を遅延タイマーにより設定できる。

4-2-3 主要機器仕様

(1) 圧力容器

内径	上部, 下部	380 mm
	下部つめもの	240 mm
	炉心部	280 mm
内部軸長		4855 mm
材質		SUS 304

(2) 破断ループ主循環ポンプ P1 (Fig. 11)

型式	堅軸渦巻形キャンドポンプ
流量	定格 460 ℓ/min
揚程	定格 30 mH ₂ O
材質	接液部 SUS 304

(3) 健全ループ主循環ポンプ P2 (Fig. 12)

型式	堅軸渦巻形キャンドポンプ
流量	定格 1400 ℓ/min
揚程	定格 40 mH ₂ O
材質	接液部 SUS 304

(4) 破断ループ蒸気発生器 SG1 (Fig. 13)

型式	堅型多管式
流体	管側: 1次冷却水, 胴側: 2次冷却水
伝熱管	19.0 O/D × 14.3 I/D × 51本
材質	管側: SUS 304, 胴側: 炭素鋼
交換熱量	726 KW
一次側保有水量	約 0.07 m ³ (チューブ内 0.042 m ³)

(5) 健全ループ蒸気発生器 SG2 (Fig. 14)

型式	堅型多管式
流体	管側: 1次冷却水, 胴側: 2次冷却水

伝熱管 19.0 O/D×14.3 I/D×123本

材質 管側：SUS304，胴側炭素鋼

交換熱量 2175KW

一次側保有水量 約0.21m³ (チューブ内0.15m³)

(6) 2次冷却水タンク SST (Fig. 15)

型式 堅置円筒型

容量 0.2m³ (水部分)

材質 炭素鋼

(7) 加圧器PR (Fig. 16)

型式 堅置円筒型

容量 0.14m³

加圧用ヒーター 20KW

材質 SUS304

(8) 破断ループアキュムレーター ACC1

型式 堅置円筒型

容量 0.23m³

加熱用ヒーター 10KW

攪拌用ポンプ 流量100ℓ/min

材質 SUS304

(9) 健全ループアキュムレーター ACC2

型式 堅置円筒型

容量 0.67m³

加熱用ヒーター 20KW

攪拌用ポンプ 流量100ℓ/min

材質 接液部SUS304

(10) 高圧注入系ポンプHPCIP

型式 プランジャーポンプ

流量 最大60ℓ/min

吐出圧 max 125kg/cm²G

材質 接液部 SUS304

(11) 高圧注入系温水タンク HPCIT

容量 300ℓ

加熱用ヒーター 20KW

材質 接液部SUS304

(12) 低圧注入系ポンプ LPCIP

型式 ブースター付遠心ポンプ

流量 290ℓ/min

揚程 200mAg

- 材 質 接液部 SUS 304
- (13) 低圧注入系温水タンク LPCIT
容 量 1500ℓ
加熱用ヒーター 20KW
材 質 接液部 SUS 304
- (14) 加圧器用給水ポンプ PRP
型 式 プランジャーポンプ
流 量 3ℓ/min
吐 出 圧 max 160 kg/cm²G
材 質 接液部 SUS 304
- (15) 給水ポンプ WSP
型 式 渦巻ポンプ
流 量 800ℓ/min
揚 程 20 mAg
材 質 SUS 304
- (16) 純水製造装置 IECH
型 式 混床式
処理水量 3 m³/h
出口比抵抗 10⁶ Ωcm以上
原 水 濾過水
- (17) 純水タンク PWT
容 量 8 m³
使用圧力 大気圧
材 質 炭素鋼内面ゴムライニング
- (18) 冷却水タンク CWT
容 量 20 m³
使用圧力 10 kg/cm²G
- (19) 急速凝縮器 RCN (Fig. 17)

これは、破断口を模擬したオリフィス部から放出する超音速の二相流中に冷水を吹きこみ、二相流の蒸気相部を凝縮させ水単相流にするための装置である。図にみられるように配管周囲に設けられたスリット部から管路の中心に向かって吹きこまれる水は超音速の二相流と激しく混合し、急速に凝縮するようになっている。なお凝縮に必要な圧力を得るために、下流側配管の末端にオリフィスがついている。

- (20) 破断機構 RD (Fig. 18)

破断口部に設置されたラプチャーディスクの中央部を槍によって突き破り、これが引金となって、系圧力によりラプチャーディスクを全面的に破る装置である。

破断口は二系統あるので、二本の槍は同時に発射されるようになっている。ラプチャーディスクは全面的な破断が行なわれるように、二枚のディスクを重ね合わせてあり、外側のものには、

スリットが刻まれている。槍の形状もこの目的を達成させるため特殊形状となっている。

(2) 模擬燃料集合体用電源および関数発生装置

(1) 模擬燃料集合体用電源

560KW容量と1680KW容量の2系統あり、これらはそれぞれ次の仕様を有する。

電 源 三相交流

電 圧 420V (50V)

電力制御方式 IVR-サイリスタ併用プログラム制御方式

(560KW容量電源についてはIVR手動制御も可能である)

(2) 関数発生装置

ブローダウン中の炉心の発熱変化を模擬するため、関数発生装置が用意されている。電力はあらかじめ紙テープ上に与えられた変化曲線にしたがって制御される。

4-2-4 模擬炉心

(1) 模擬燃料集合体

電気加熱による間接発熱方式の高熱流束ならびに低熱流束の模擬燃料棒から成る。一次集合体では6本が最高61KW/mまで出せる高熱流束模擬燃料棒、90本が12KW/mの低熱流束模擬燃料棒、13本が非発熱のタイロッドとなっている。

炉心内の発熱分布は一次燃料集合体では各燃料棒が軸方向に一様分布発熱、二次燃料集合体では高熱流束燃料棒がcos分布発熱、三次および四次燃料集合体では、全発熱燃料棒がcos分布発熱になった上にさらに、炉心中央部と外周部とで燃料棒一本当たりの発熱量を二領域に変化させる方式をとる予定となっている。

模擬燃料棒の内、数本は被覆管の温度を計測する計測用模擬燃料棒である。これは、軸方向に5点の熱電対が取付けられており、棒表面温度変化を計測する。模擬燃料集合体をFig. 19に示し、模擬燃料棒をFig. 20に示す。

さらに、3次以降で炉心内のボイド率、流れ方向、流速等の流動状態を計測する装置を取付ける予定である。

以上の主要仕様をTable 9, Table 10に示す。

(2) 炉心温度監視装置

数本の燃料棒の軸方向に5点の温度監視用の熱電対を取付け、その内の1~3点が設定温度以上になったとき電源が切られるようになっている。

4-2-5 一次系の配管

Fig. 21~ Fig. 23に低温側配管破断、高温側配管破断、ならびにポンプ吸込側配管破断実験における一次系配管図をECC水の注入位置と共に示す。

4-2-6 制御および計測系

Fig. 16にプロセス制御系のフローシートを示す。これらのプロセス制御用機器の主な仕様をTable 11に示す。

実験用の計測系のフローシートはすでにFig. 3に示したが、これらの計測機器の主な仕様はTable 1に示してある。

4-2-7 データ集録装置

Table 1に示される計測系よりの多数のアナログ信号をデジタル化し、磁気テープに集録する

もので、最大120のチャンネル数を有する。集録速度は最大毎秒30,000点・chであり、このときの集録時間は約4分である。また、未飽和減圧過程などの変化の速い信号データを記録するアナログデータレコーダーも用意されている。

さらに、炉心温度監視装置によっても、Table 12に示すように、最大毎秒100点・chの集録速度で、約5分間のデータ集録が可能である。

集録したデータは、電子計算機にかけてブラウン管ディスプレイならびにプロッターにハードコピーできるほかシンクロスコープ、電磁オシログラフ、ペンレコーダーなどのディスプレイ機器に再生できるようにしている。

4-3 炉心計測法の開発

炉心部における熱水力学諸量の計測は、燃料棒の伝熱機構の説明およびLOCA計算コードの検証のために最も重要なことである。そこでROSA-II計画では、炉心計測法の開発に力を入れている。

4-3-1 燃料被覆材温度

第1次模擬燃料集合体では、肉厚1.3mmのインコネル600製被覆管の内面5ヶ所に設けた、巾0.5mm、深さ0.5mmの縦ミゾに、シース外径0.5mmφのCA熱電対を、共引き加工により圧着したものを用いて、燃料棒被覆材温度の挙動を測定する。

この方法では、被覆材表面温度よりもやや高めの温度を検出するだけでなく、流体側の速い冷却状態の変化に十分追従するか疑問であり、さらに熱電対の圧着状態による接触熱抵抗にもとづく測定誤差を生ずるおそれもある。そこで第2次模擬燃料集合体では、被覆管の外表面に設けた、半径0.325mm、長さ1.5mmの半円断面の縦ミゾに、シース外径0.65mmφの熱電対をおさめ、先端をTIG熔接したものを用いて、燃料棒被覆材温度の挙動を測定する。

この方法なら、上記の欠点は解決できるが、再冠水過程では、非発熱の熱電対を伝ってECCS注入水が熱電対測温部に導かれて測定誤差の原因になるのみならず、導かれたECCS注入水の先行冷却効果により、燃料棒の冷却過程そのものを変えるおそれがある。

そこで第3次および第4次模擬燃料集合体では、被覆材外表面に設けた巾0.5mm、深さ0.5mmのU形断面の縦ミゾに、シース外径0.5mmφの熱電対をおさめてスエージ圧着し、先端をTIG熔接して使用する。予備実験によれば、この方法があらゆる点で最もよいという結果が得られている。

なお、第3次燃料集合体では、熱流束測定用に、炉心中央燃料棒では、第1次燃料集合体と同様の方法で、被覆材内面にも熱電対を設ける。また、第3次燃料集合体以降では、燃料棒以外に、非発熱面の温度を測定する目的で、コアバレル内面でも温度測定を行なう。

4-3-2 流れ方向計

スプリングにより燃料棒表面に支えられたフィン付き管の運動を、差動変圧器の原理で検出して、電気信号として外部に取出すもので、 $\pm 0.5 \text{ m/s}$ 以上の流れの方向を検出することを目標に開発中である。

主要部の構造はFig. 24に示す通りであり、第3次模擬燃料集合体から実際に取付けられる。流れの方向だけでなく、流速それ自身についても定性的な情報が得られることを期待している。

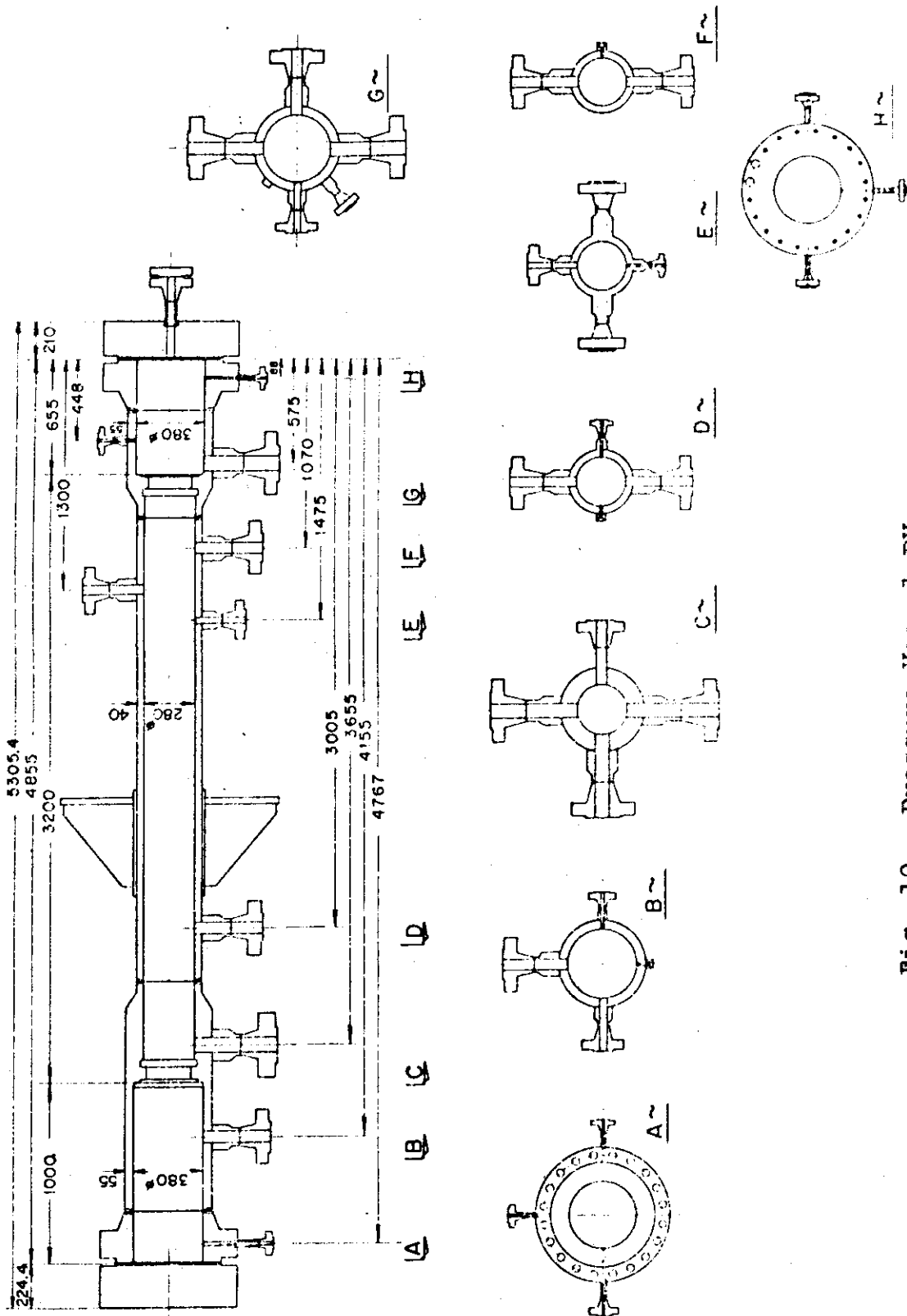


Fig. 10 Pressure Vessel PV

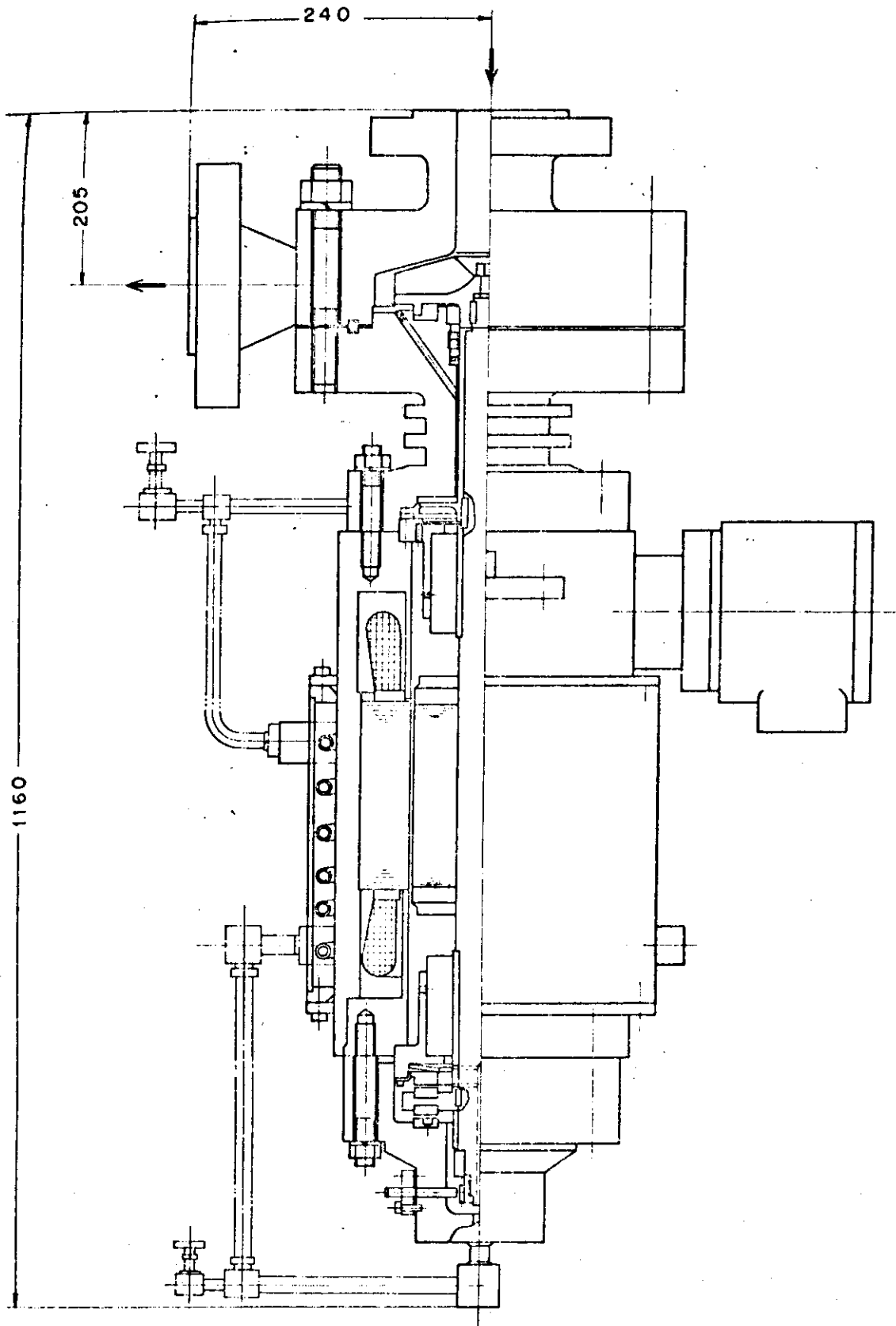


Fig. 11 Circulation Pump Pl

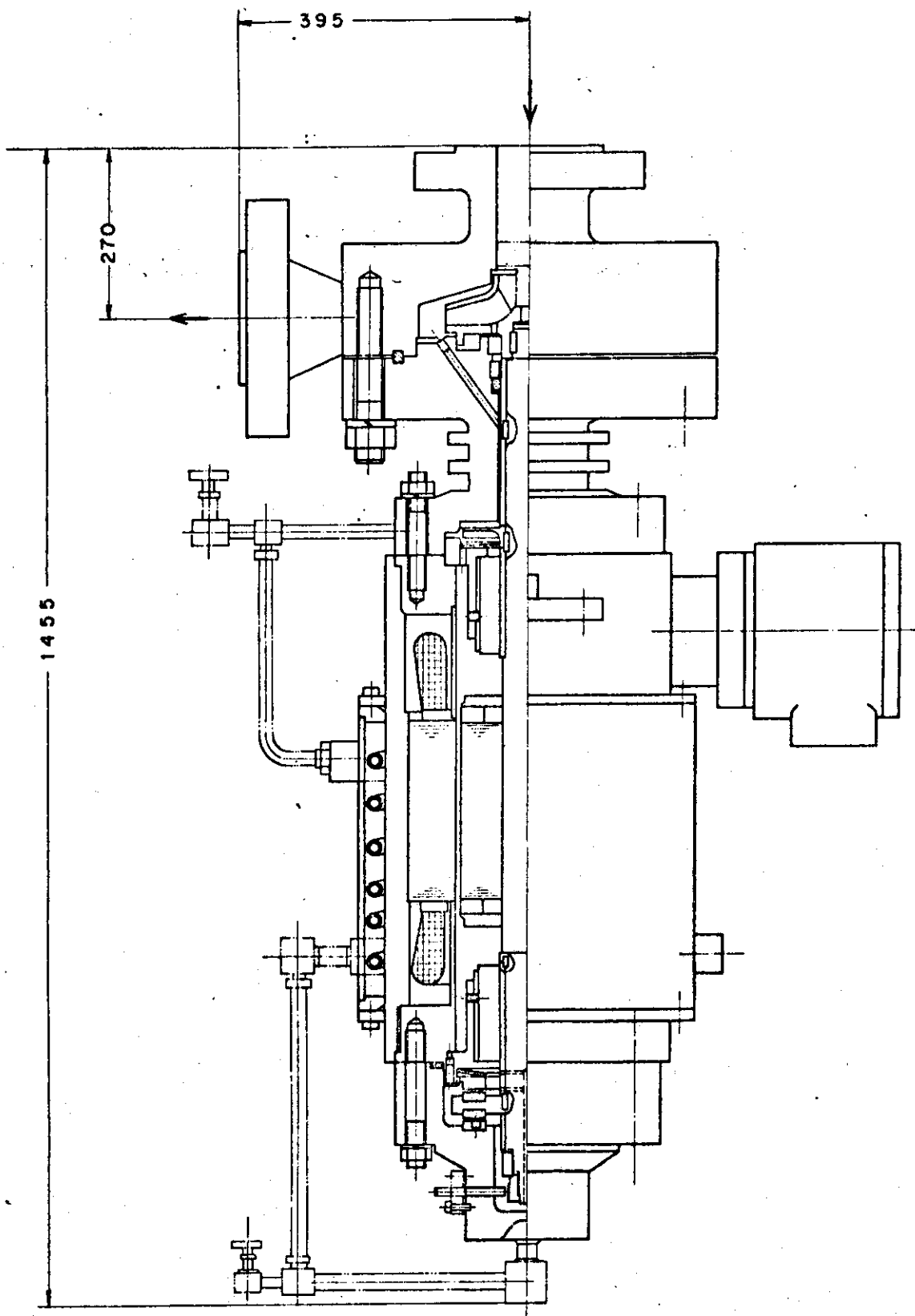
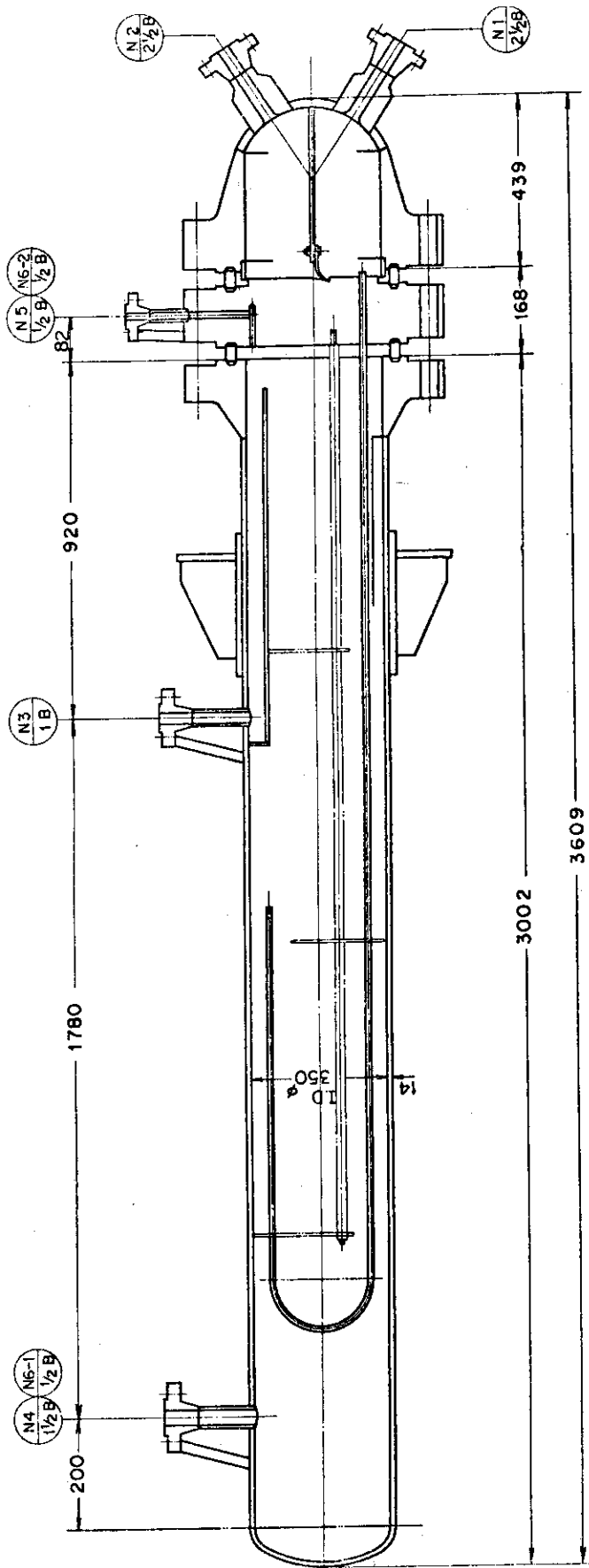


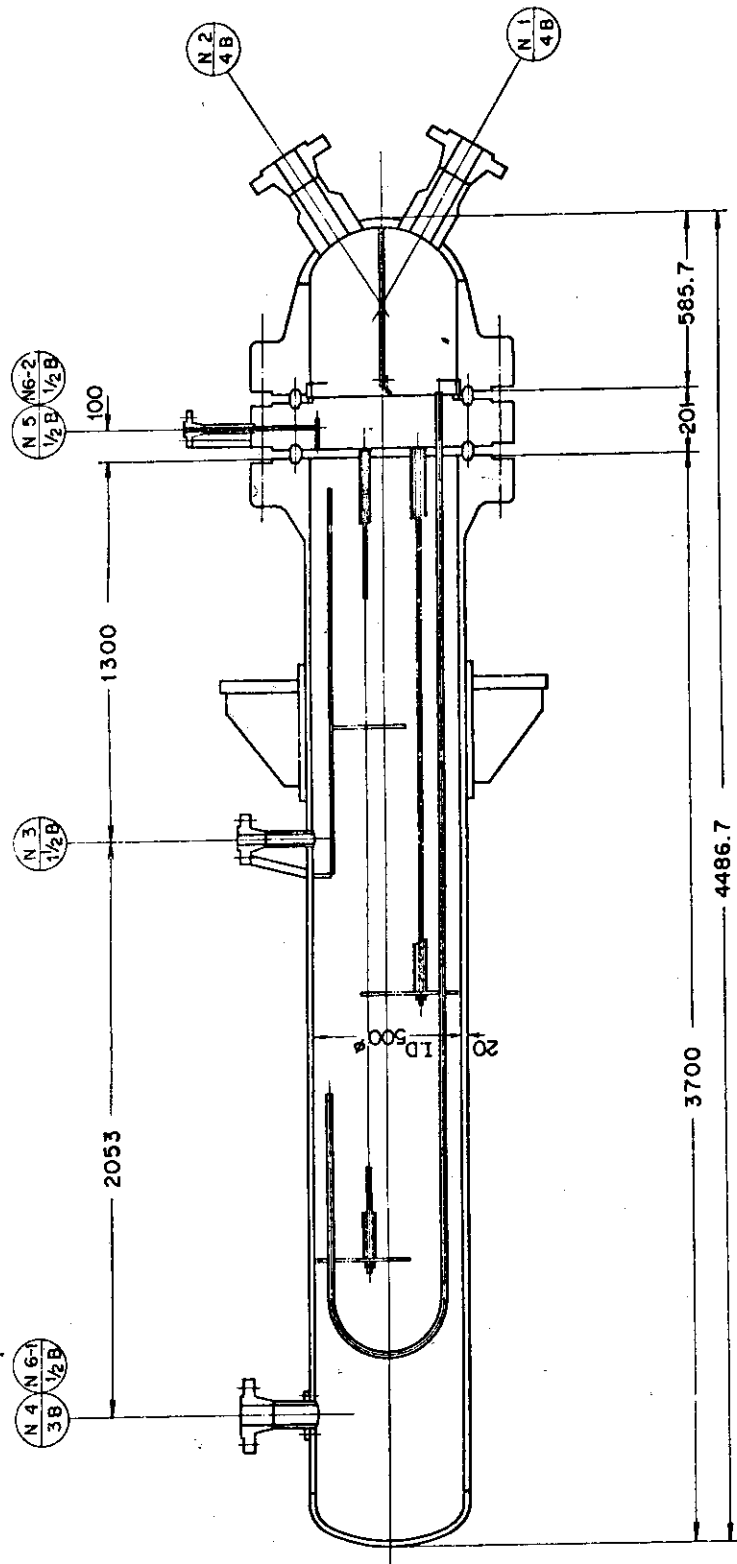
Fig. 12 Circulation Pump P2



Design	Conditions	
	Shell Side	Tube Side
Pressure (Kg/cm ² G)	65	165
Temperature (°C)	325	325
Volume (m ³)	0.032	0.042
Weight (Kg)	1700	
U - Tube	19.0° O.D./14.3° I.D. - 51 tubes	

Symbol	REQ'D NO.	Diameter	Nozzles Connection
N 1	1	2 1/2 B	Primary Water Inlet
N 2	1	2 1/2 B	Primary Water Outlet
N 3	1	1 B	Secondary Water Inlet
N 4	1	1 1/2 B	Secondary Water Outlet
N 5	1	1 1/2 B	Drain
N 6-1	1	1/2 B	Water Level Meter
N 6-2	1	1/2 B	Water Level Meter

Fig. 13 Steam Generator SGL



Design	Conditions	
	Shell Side	Tube Side
Pressure (Kg/cm ² G)	6.5	16.5
Temperature (°C)	32.5	32.5
Volume (m ³)		
Weight (Kg)		
U - Tube	19.0 ^φ O.D. / 14.3 ^φ I.D. - 123 tubes	

Symbol	REQ'D NO.	Diameter	Nozzles Connection
N 1	1	4 B	Primary Water Inlet
N 2	1	4 B	Primary Water Outlet
N 3	1	1/2 B	Secondary Water Inlet
N 4	1	3 B	Secondary Water Outlet
N 5	1	1/2 B	Drain
N 6-1	1	1/2 B	Water Level Meter
N 6-2	1	1/2 B	Water Level Meter

Fig. 14 Steam Generator SG2

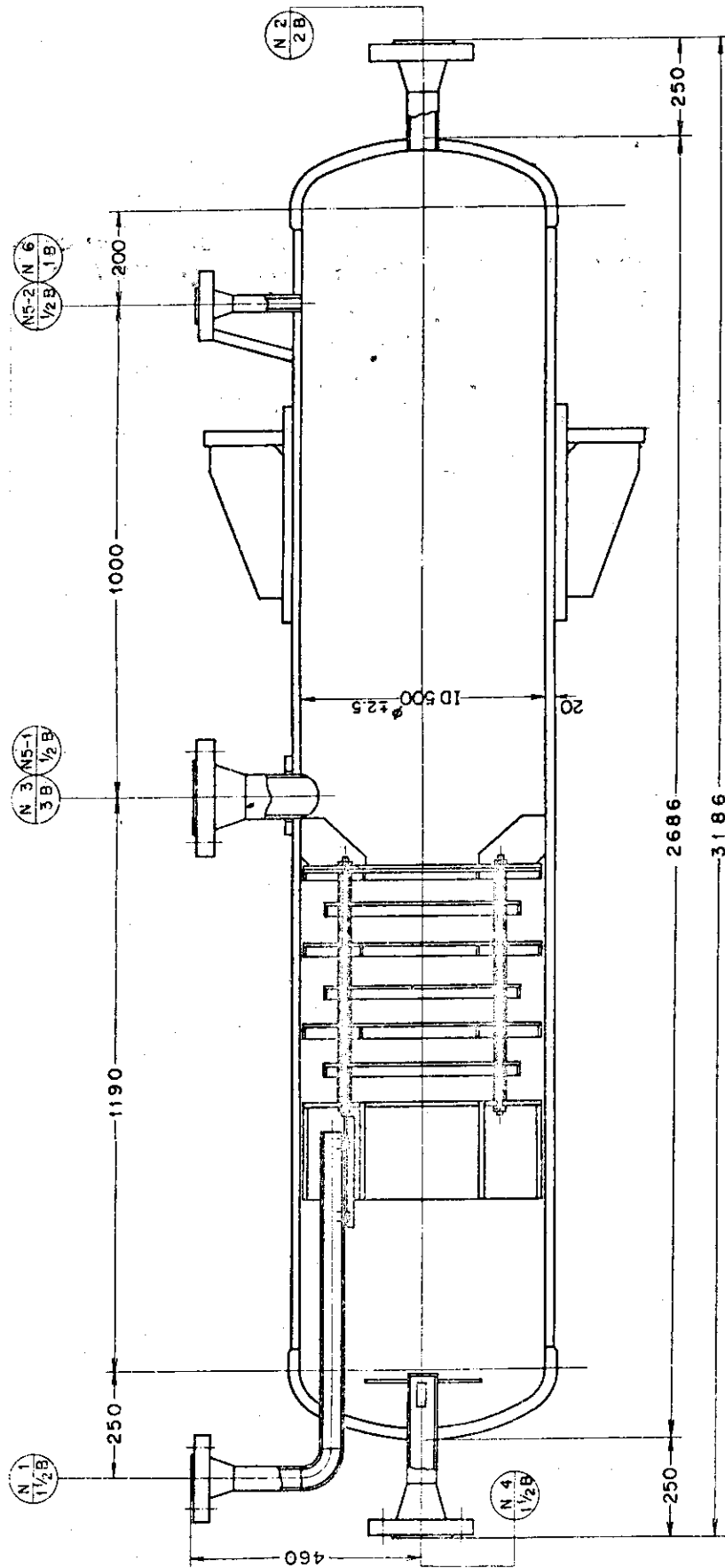
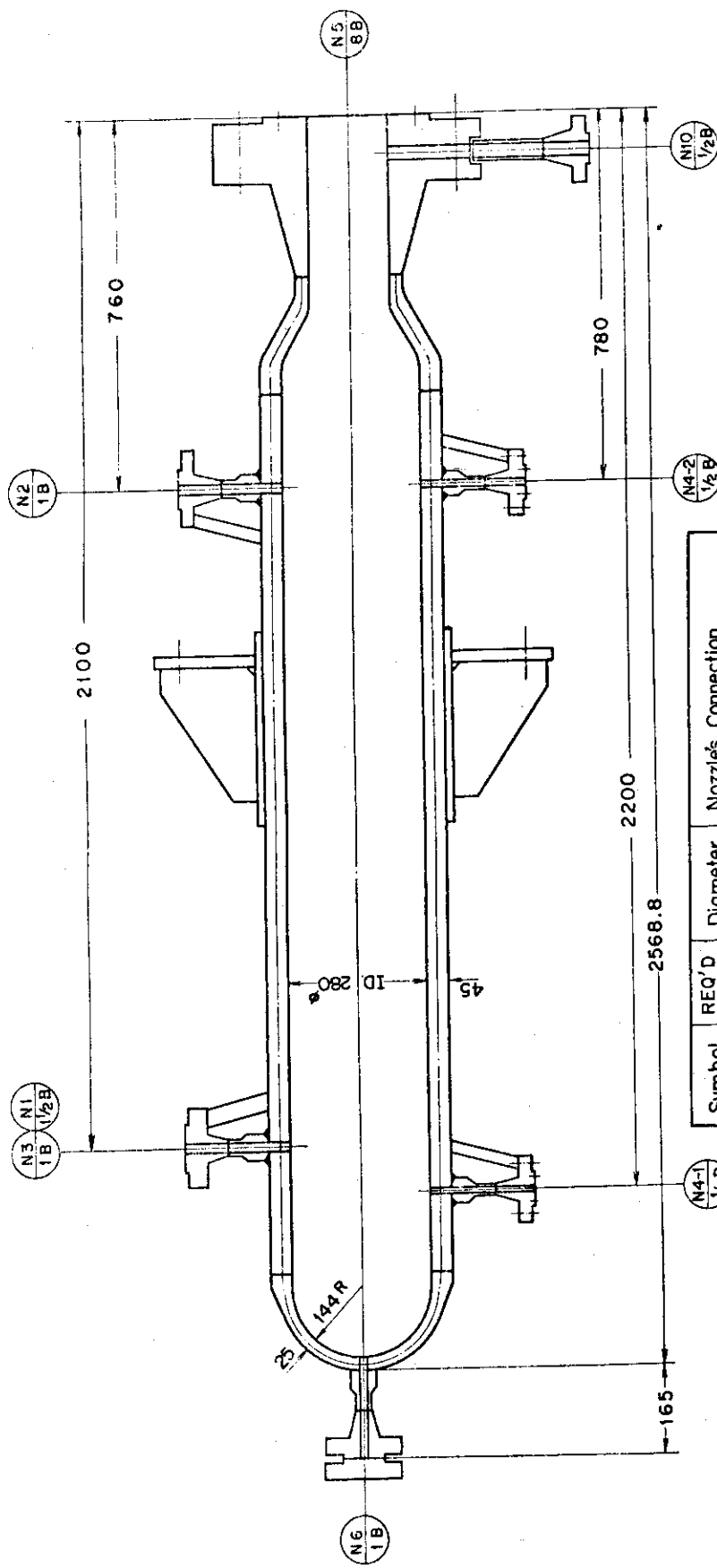


Fig. 15 Secondary Surge Tank SST

Symbol	REQ'D NO.	Diameter	Nozzles Connection
N 1	1	1 1/2 B	Water Supply
N 2	1	2 B	Water Outlet
N 3	1	3 B	Steam Inlet
N 4	1	1 1/2 B	Steam Outlet
N 5-1	1	1/2 B	Water Level Meter
N 5-2	1	1/2 B	Water Level Meter
N 6	1	1 B	Thermometer



Design Conditions	
Volume (m ³)	0.14
Pressure (Kg/cm ² G)	165
Temperature (°C)	346
Weight (Kg)	1100

Symbol	REQ'D NO.	Diameter	Nozzles Connection
N 1	1	1 1/2 B	Safety valve
N 2	1	1 B	Primary Loop
N 3	1	1 B	Thermometer (Steam Temperature)
N 4 - 1	1	1/2 B	Water Level Meter
N 4 - 2	1	1/2 B	Water Level Meter
N 5	1	8 B	Hecter
N 6	1	1 B	Level Glass
N 7	1	1/2 B	Thermocouple
N 8	1	PS 1/2 B	Pressure Transducer
N 9	1	1 B	Thermometer (Water Temperature)
N 10	1	1/2 B	Drain

Fig. 16 Pressurizer PR

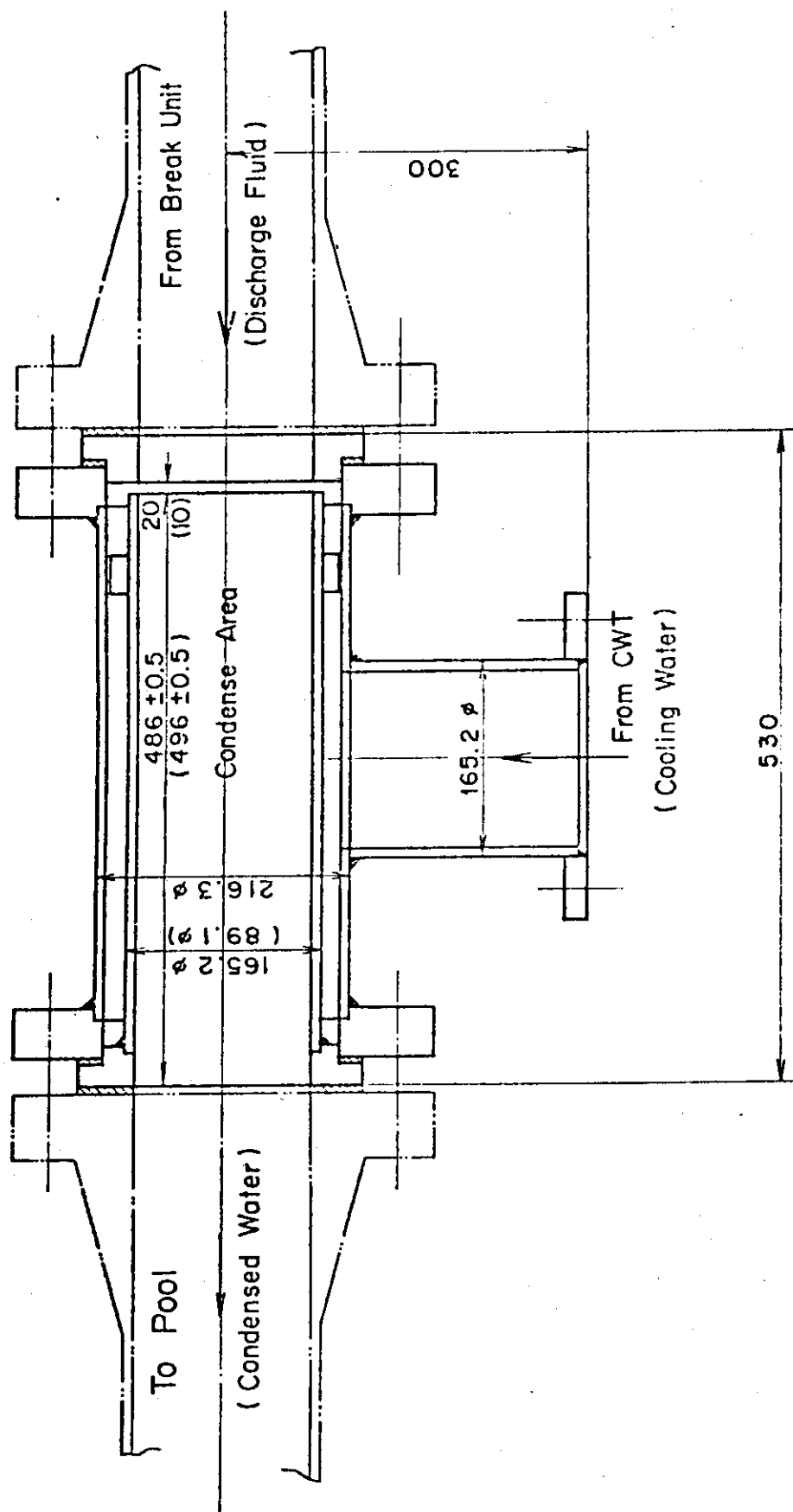


Fig. 17 Rapid Condenser RCN

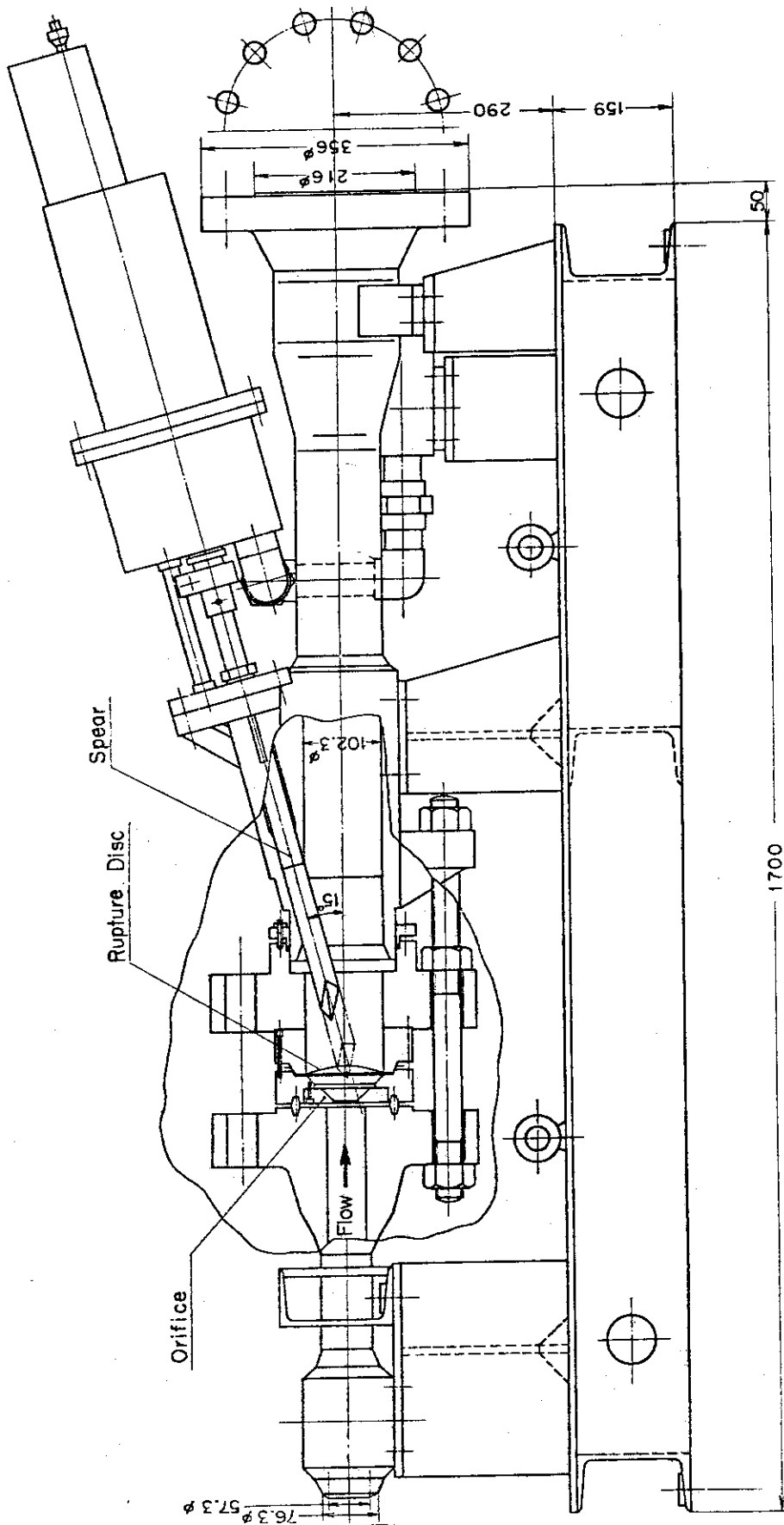
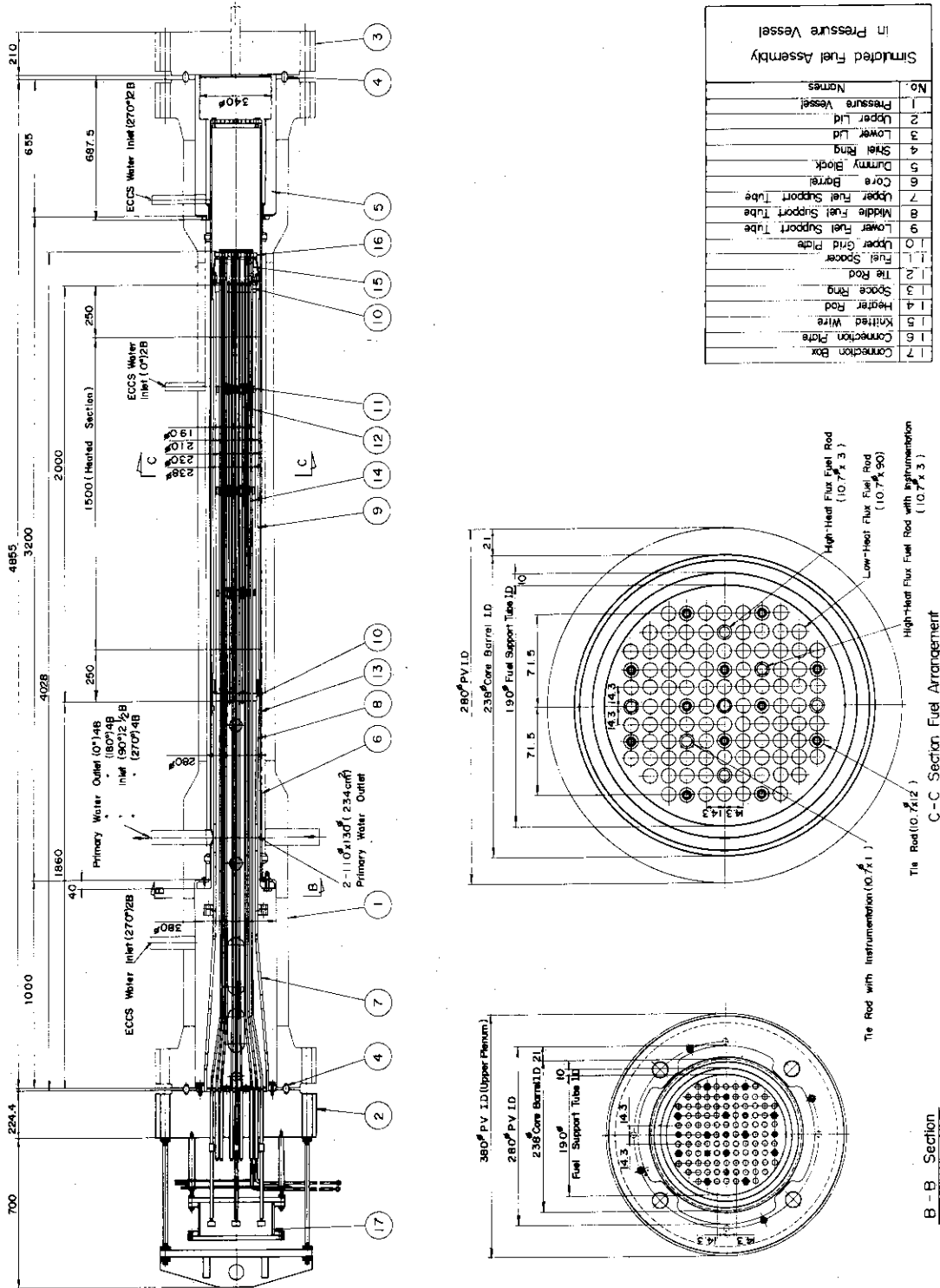


Fig. 18 Rupture Disc Device



No.	Names
1	Pressure Vessel
2	Upper Lid
3	Lower Lid
4	Steel Ring
5	Dummy Block
6	Core Barrel
7	Upper Fuel Support Tube
8	Middle Fuel Support Tube
9	Lower Fuel Support Tube
10	Upper Grid Plate
11	Fuel Scoop
12	Tie Rod
13	Spoce Ring
14	Heater Rod
15	Knitted Wire
16	Connection Plate
17	Connection Box

Fig. 19 Simulated Fuel Assembly in the Pressure Vessel

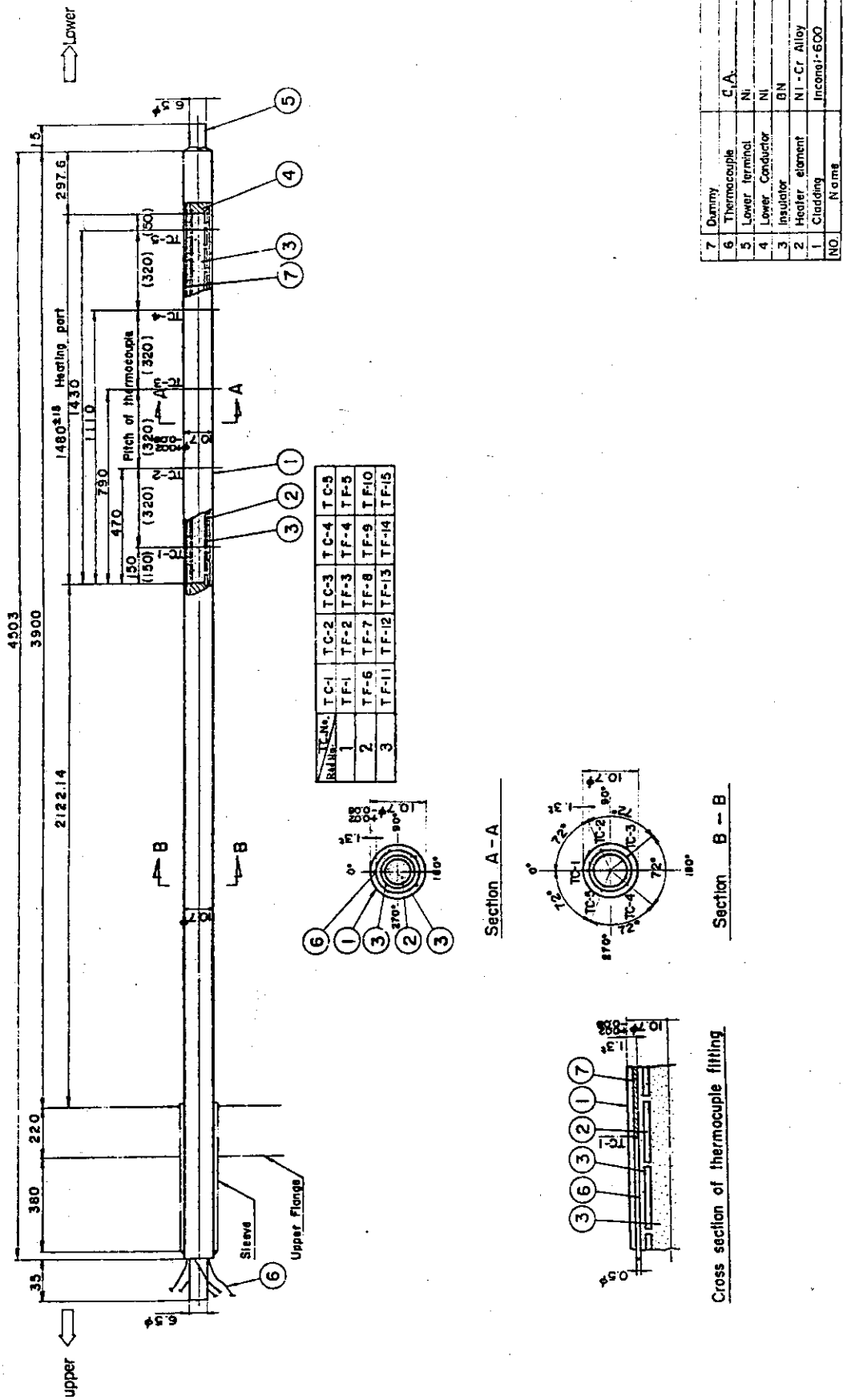


Fig. 20 Model Fuel Rod

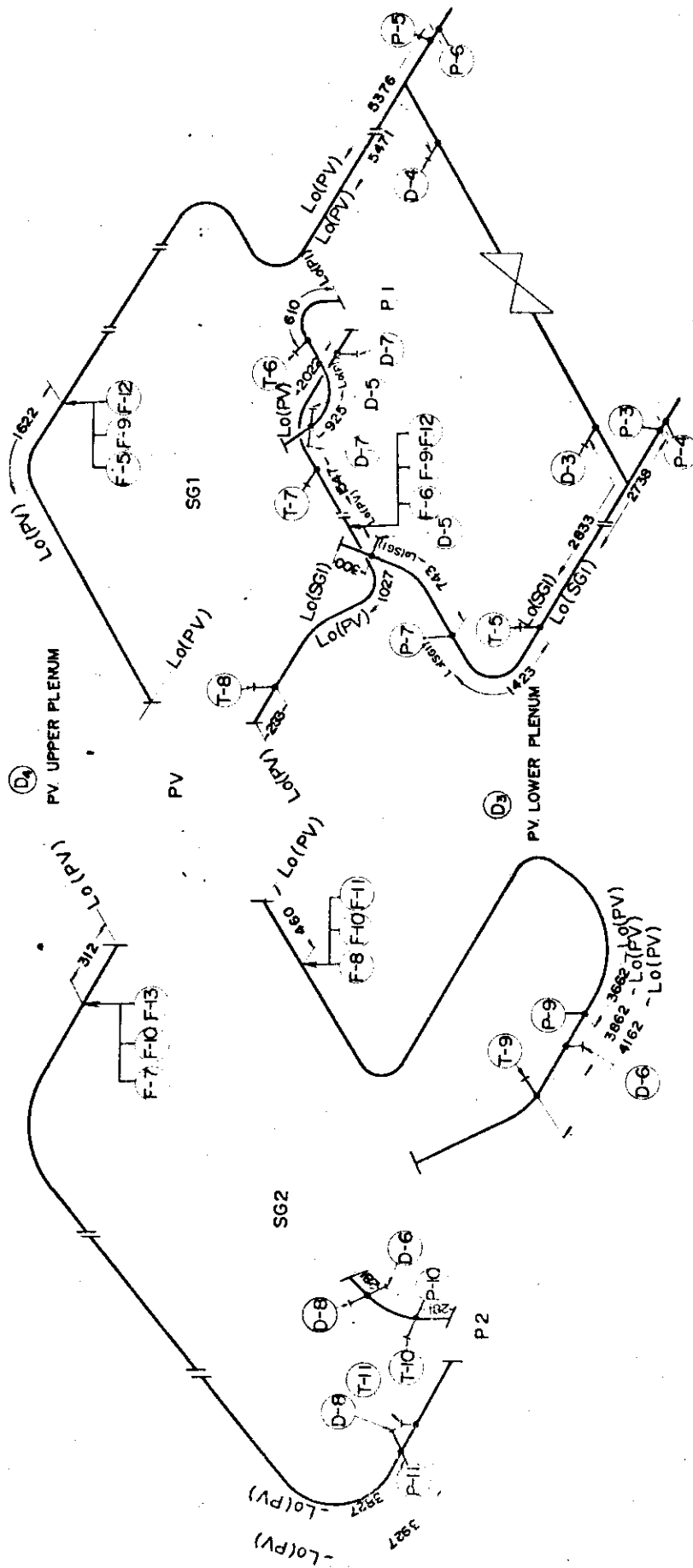


Fig. 21 Primary Piping for the Hot Leg Break Test

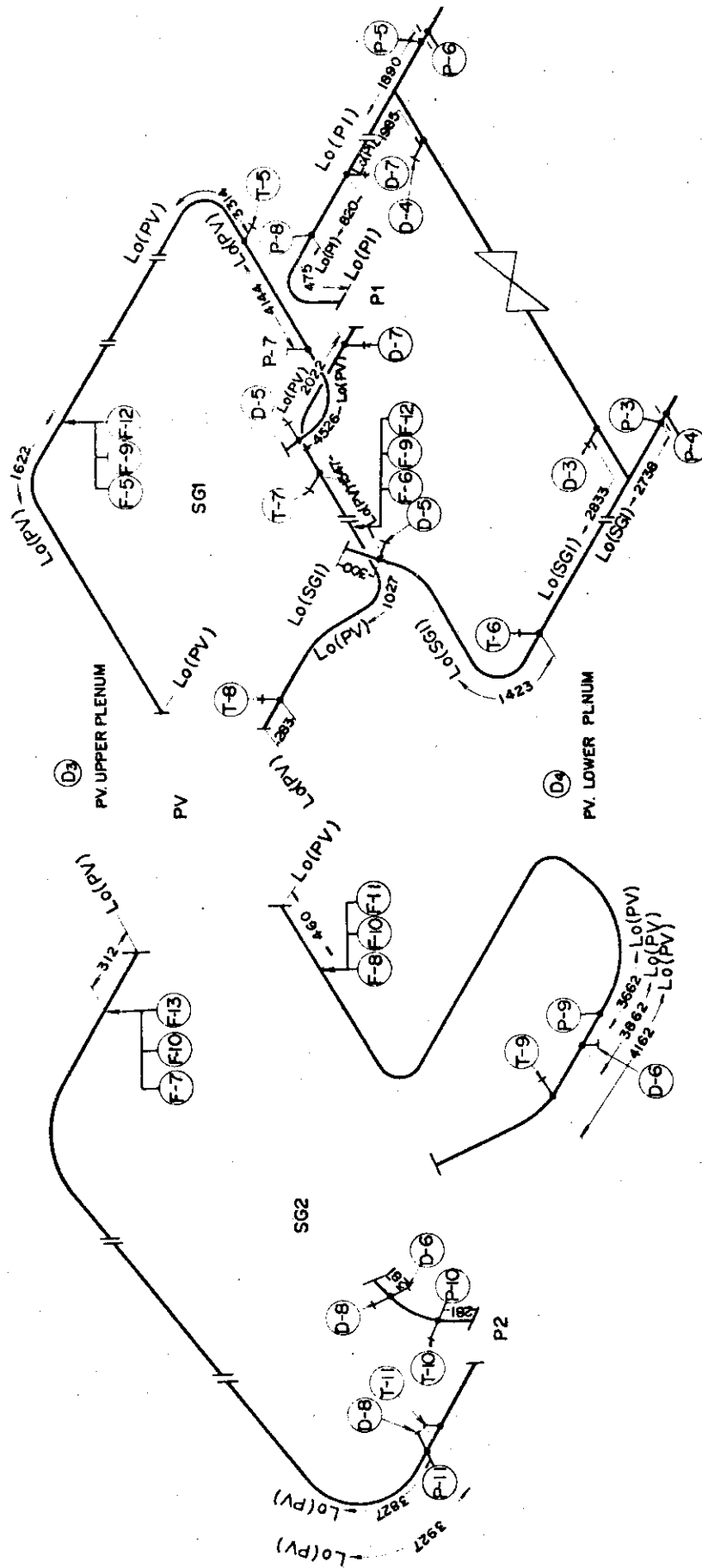


Fig. 22 Primary Piping for the Pump Suction Side Break Test

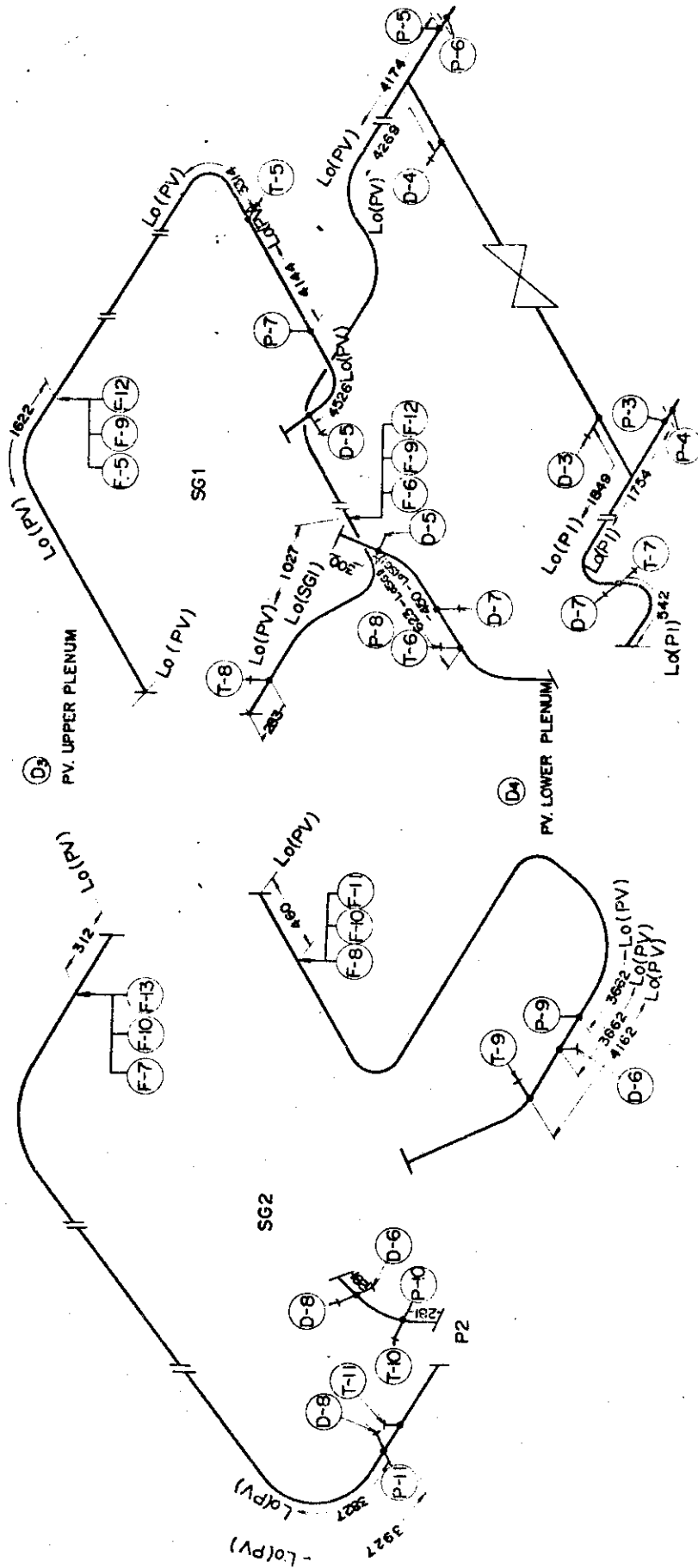


Fig. 23 Primary Piping for the Cold Leg Break Test

Table 9 Simulated Fuel Assemblies

Assembly No.	1	2	3	4
Material				
Heater Element	NCH-1	NCH-1	NCH-1	NCH-1
Cladding	Inconel	Inconel	Inconel	Inconel
Dimension				
Outer Diameter(mm)	10.7	10.7	10.7	10.7
Heating Length(mm)	1500	1500	1500	1500
Lattice Pitch(mm)	14.3	14.3	14.3	14.3
Number				
Low Flux Rods	90	90	83	83
High Flux Rods	6	6	21	21
Unheated Rods	13	13	17	17
Total	109	109	121	121
Power Distribution				
Low Flux Rods	Uniform	Uniform	Cosine*	Cosine*
High Flux Rods	Uniform	Cosine*	Cosine*	Cosine*
Horizontal Distribution	-	-	2-Region	2-Region
Maximum Heating Rate				
Low Flux Rods(kW/m)	12.5	12.5	21.6	21.6
High Flux Rods(kW/m)	61.6	61.6	27.3	27.3
Maximum Temperature				
Fuel Center(deg.C)	1100	1100	1100	1100
Fuel Surface(deg.C)	700	700	1000	1000
Heating Power				
Total Power(kW)	2240	1890	2240	2240

* Chopped Cosine Distribution of 4 Steps for the Half Length.

Table 10 In-Core Instrumentation

Assembly No.	1	2	3	4	Note
Thermo-Couple					
Low Flux Rods	0	0	25	25	Some for B0 detector are included. Some for B0 detector are included.
High Flux Rods	15	36	25	20	
Tie Rods	5	5	0	0	
Inside of Inner Core Barrel	0	0	18	18	
Total	20	41	68	63	
Level Meter					
Subchannel	0	Tried	0	0	
Inside of Inner Core Barrel	0	0	18	18	
Flow Direction Meter	0	0	Tried	3	Axial 3 points.
Electro-Magnetic Flow Meter	0	0	Tried	Tried	
Void Meter	0	0	Tried	Tried	

Table 11 Instrumentation for the ROSA-II Operation

TAG NO.	NAME	DETECTORS & TRANSMITTERS	RANGE	NOTE.
CR1-CE 11	Electrical Conductivity of IECH. Exit	Through Type Detector for Liquid	0 ~ 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
CR1-CE 12	of PWT	Electrical Conductivity Detector for Liquid		
CR1-CTE 12	Temperature at PWT	Temperature Measuring Resistor (Ni, 100 Ω)	-5 ~ 45°C	For the Temperature Compensation of Electrical Conductivity
TR1-TE 11	at Upper Part of PV	↑	0 ~ 400°C	
TR1-TE 12	at Lower Part of PV	↑	↑	
TR1-TE 13	at PR	↑	↑	Also used, for the Temperature Compensation of PR Water Level
TR1-TE 14	at SST	↑	↑	Also used for the Temperature Compensation of both SST Water Level and Flow Rate of Secondary Coolant.
TR1-TE 15	at SG 1 Outlet.	↑	↑	Also used for the Temperature Compensation of SG1 Water Level
TR1-TE 16	Temperature of Secondary Coolant at SG 2 Outlet	↑	↑	Also used for the Temperature Compensation of SG2 Water Level
TR2-TE 21	Temperature at HPCIT	↑	0 ~ 200°C	
TR2-TE 22	at LPCIT	↑	↑	
TR2-TE 23	at ACC1	↑	↑	
TR2-TE 24	at ACC2	↑	↑	
TR2-TE 25	Difference between PR and at Upper Part of PV	↑	0 ~ 50°C	TE13 - TE11
TR2-TE 26	Temperature at CWT	↑	↑	
TRC3-TE31	at SG1 Outlet	↑	0 ~ 400°C	
TRC3-TE32	Temperature of Primary Coolant at SG1 Inlet	↑	↑	
TRC4-TE41	Temperature of Primary Coolant at SG2 Outlet	↑	↑	
TRC4-TE42	Temperature of Primary Coolant at SG2 Inlet	↑	↑	

Cont.

TAG NO.	NAME	DETECTORS & TRANSMITTERS	RANGE	NOTE
PRC1-PX11	Pressure at PR	Electronic Pressure Indicator Transmitter	0~200 atg	
PR2 - PX21	" at Upper Part of PV	"	"	
PR2 - PX22	" at ACC1	"	0~100 atg	
PR2 - PX23	" at ACC2	"	"	
PRC3 - PX31	" at SST	"	"	
PI4 - PIX41	" at CWT	"	0~20 atg	
PI5 - PIX51	" at AT	"	"	
PI6 - PIX61	" at HPCIT	"	"	
LR1 - LX11	Water Level at PR	Electronic Pressure Difference Transmitter	0~2 m	
LRC2-LX21	" at SST	"	"	
LR3 - LX31	" at ACC1	"	0~3m	
LR3 - LX32	" at ACC2	"	"	
LR3 - LX33	" at HPCIT	"	"	
LR3 - LX34	" at LPCIT	"	"	
LR4 - LX41	" at SG1	"	0~4 m	
LR4 - LX42	" at SG2	"	"	
LR5 - LX51	" at CWT	"	0~3m	
LR5 - LX52	" at PWT	"	"	
LR5 - LX53	" at P00	"	"	
FRIC1-FX11	Flow Rate of Primary Coolant in the First Loop	"	0~500 l/min	Bubble Tube is used Venturi Tube is used
FRIC1 - FTE11	Temperature of Primary Coolant in the First Loop	Temperature Measuring Resistor (Pt. 100Ω)	0~400°C	For the Temperature Compensation of Flow Rate
FRIC1 - FX12	Flow Rate of Primary Coolant in the Second Loop	Electronic Pressure Difference Transmitter	0~1500 l/min	Venturi Tube is used
FRIC1 - FTE12	Temperature of Primary Coolant in the Second Loop	Temperature Measuring Resistor (Pt. 100Ω)	0~400°C	For the Temperature Compensation of Flow Rate
FR2 - FX21	Flow Rate of Secondary Coolant in the First Loop	Electronic Pressure Difference Transmitter	0~50 l/min	Orifice is used
FR2 - FX22	Flow Rate of Secondary Coolant in the Second Loop	"	0~150 l/min	"
FR3 - FX31	Flow Rate of LPCIP	"	0~500 l/min	"
FE41 - FX41	" of Water flow from CWT	Electromagnetic Flow Rate Meter	0~250 Kg/sec	"

Cont.

TAG NO.	NAME	DETECTORS & TRANSMITTERS	RANGE	NOTE
FE42-FX42	Flow Rate of Water flow from CWT	Electromagnetic Flow Rate Meter	0~250 Kg/sec	
FE61-FX61	↑ In Discharge System	↑	↑	
FE62-FX62	↑ In	↑	↑	
FE71-FX71	↑ of ACC 1	↑	0~300 ℓ/min	
FE72-FX72	↑ of ACC 2	↑	0~1000 ℓ/min	
FE73-FX73	↑ of ACC 2	↑	↑	
FE81-FX81	↑ of HPCI	↑	0~50 ℓ/min	
FE82-FX82	↑ of	↑	↑	
FE83-FX83	↑ of	↑	0~20 ℓ/min	
FE84-FX84	↑ of	↑	↑	
FE91-FX91	↑ of LPCI	↑	0~110 ℓ/min	
FE92-FX92	↑ of	↑	0~300 ℓ/min	
RI1 - RX11	Revolution Number of P1	Electromagnetic Tacho Generator	0~5000 rpm	
RI2 - RX21	↑ of P2	↑	↑	

Table 12 Data Recording by the Core Protection Equipment

DATA CH.NO.	MEAS. ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	NOTE
1	TEMP. (FUEL)	TF-	FOR EXPERIMENT (HIGH FLUX ROD)	TERMOCOUPLE C/A UNGROUNDED (0.65φ)	0 ~ 1000°C	CONNECTED TO DATAC 2000B & CORE TEMPERATURE MONITOR
2	"		"	" (")	"	
3	"		"	" (")	"	
4	"		"	" (")	"	
5	"		"	" (")	"	
6	"		"	" (0.5φ)	"	
7	"		"	" (")	"	
8	"		"	" (")	"	
9	"		"	" (")	"	
10	"		"	" (")	"	
11	"		"	" (")	"	
12	"		"	" (")	"	
13	"		"	" (")	"	
14	"		"	" (")	"	
15	"		"	" (")	"	
16	"		"	" (")	"	
17	"		(LOW FLUX ROD)	" (")	"	
18	"		"	" (")	"	
19	"		"	" (")	"	
20	"		"	" (")	"	
21	"		"	" (")	"	
22	"		"	" (")	"	
23	"		"	" (")	"	
24	"		"	" (")	"	
25	"		"	" (")	"	
26	"		"	" (")	"	
27	"		"	" (")	"	
28	"		"	" (")	"	
29	"		"	" (")	"	
30	"		"	" (")	"	
31	"		FOR MONITORING (HIGH FLUX ROD)	" (")	"	

DATA CH.NO.	MEAS. ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	NOTE
32	TEMP. (FUEL)		FOR MONITORING (HIGH FLUX ROD)	THERMOCOUPLE C/A UNGROUNDED (0.5 φ)	0 ~ 1000°C	TO CORE TEMPERATURE MONITOR
33	"		" 18	" (")	"	"
34	"		"	" (")	"	"
35	"		"	" (")	"	"
36	"		FOR MONITORING (LOW FLUX ROD)	" (")	"	"
37	"		"	" (")	"	"
38	"		"	" (")	"	"
39	"		"	" (")	"	"
40	"		" 44	" (")	"	"
41	"		"	" (")	"	"
42	"		"	" (")	"	"
43	"		"	" (")	"	"
44	"		"	" (")	"	"
45	"		"	" (")	"	"
46	"		CLAC INSIDE TEMPERATURE	" (")	"	TO DATAC 2000B & CORE TEMPERATURE MONITOR
47	"		"	" (")	"	"
48	"		" 66	" (")	"	"
49	"		"	" (")	"	"
50	"		"	" (")	"	TO DATAC 2000B & CORE TEMPERATURE MONITOR
51	TEMP. (SUPPORT)		SUPPORT TEMP.	" (1.6 φ)	0 ~ 500°C	TO CORE TEMPERATURE MONITOR
52	"		"	" (")	"	"
53	"		" 90°	" (")	"	"
54	"		" (WEST)	" (")	"	"
55	"		"	" (")	"	"
56	"		"	" (")	"	"
57	"		"	" (")	"	"
58	"		"	" (")	"	"
59	"		"	" (")	"	"
60	"		"	" (")	"	"
61	"		" 270°	" (")	"	"
62	"		" (EAST)	" (")	"	"
63	"		"	" (")	"	"

DATA CH.NO.	MEAS. ITEM	SYMBOL	NAME (MEASURING POINT)	SENSOR SPECIFICATION	MEAS. RANGE & OUTPUT	NOTE
64	TEMP. (SUPPORT)		SUPPORT TEMP.	THERMOCOUPLE C/A UNGROUNDED " (1.6 φ)	0 ~ 500°C	TO CORE TEMPERATURE MONITOR
65	"		"	" (")	"	"
66	"		" 270°	" (")	"	"
67	"		" (EAST)	" (")	"	"
68	"		"	" (")	"	"
69	UO. LEVEL (SUPPORT)		CORE WATER LEVEL	PROBE TYPE	ON-OFF	TO CORE TEMPERATURE MONITOR
70	"		"	"	"	"
71	"		"	"	"	"
72	"		"	"	"	"
73	"		" 90°	"	"	"
74	"		" (WEST)	"	"	"
75	"		"	"	"	"
76	"		"	"	"	"
77	"		"	"	"	"
79	"		"	"	"	"
80	"		"	"	"	"
81	"		" 270°	"	"	"
82	"		" (EAST)	"	"	"
83	"		"	"	"	"
84	"		"	"	"	"
85	"		"	"	"	"
86	"		"	"	"	"
87	FLOW RATE		CORE	ELECTRO-MAGNETIC FLOW METER		
88	VOID		"	ELECTROSTATIC TYPE PROBE		
89	FLOW DIRECTION		"	DTF TYPE		
90	"		"	"	32	
91	"		"	"		

4-3-3 探針式ボイド計

Fig. 25 に示す構造の検出端を用いて、流体側の電気抵抗の変化により、炉心内の水位の変化を検出するものであるが、連続的にボイド率が変化する場合のデータも得ることができる。

第2次模擬燃料集合体で試験的に使用した後、第3次燃料集合体以後、本格的に使用する予定である。

この検出器から得られる信号はON-OFF信号であるが、波形整形・積分回路を用いれば、時間平均ボイド率として取出すことも可能である。また、第3次燃料集合体以降では、同様の方法を用いてコアバレル内面における液面の測定も行なう。(Fig. 26)

4-3-4 静電容量式ボイド計

模擬燃料棒の一部を、Fig. 27 に示すような円筒形検出端を持つ静電容量式ボイド計で置換え、サブチャンネル内の平均ボイド率を測定する。検出端の直径は燃料棒と同じ10.7 mmφであるから、サブチャンネル内の流れを妨害することはない。

近接する2個の検出端の信号の相互相関をとることによって、気液境界面の移動速度を測定する事も計画している。

本ボイド計は、第5次模擬燃料集合体から取付けられる予定である。

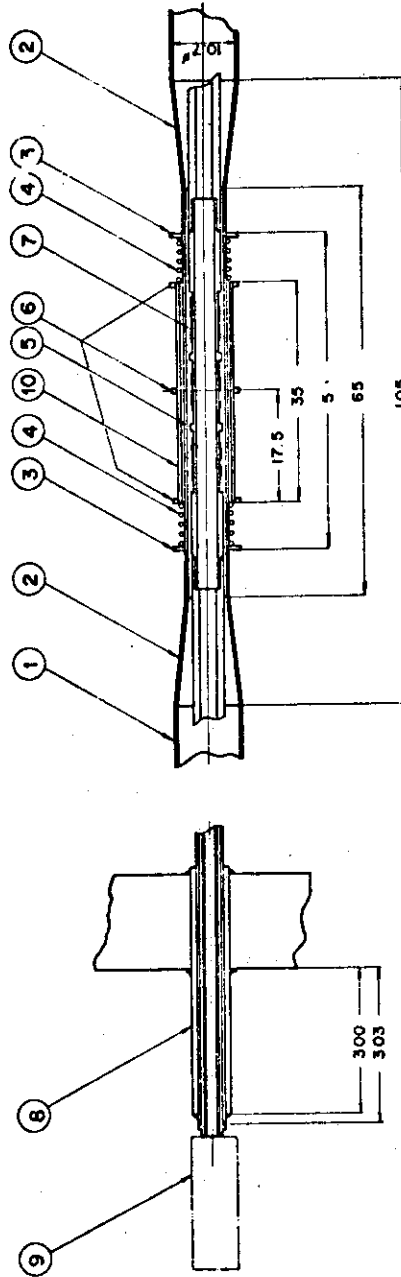
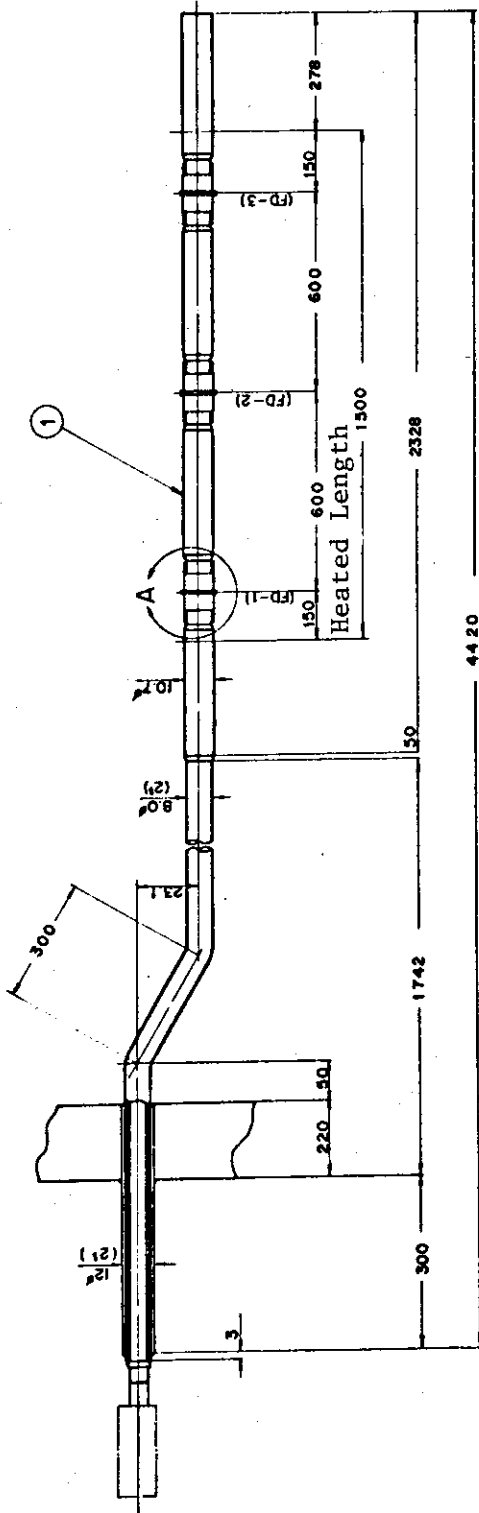
4-3-5 小型電磁流量計

Fig. 28 に示すような、円筒形永久磁石を用いた直流式電磁流量計を用いて、炉心内の液相の流速(方向共)を測定するもので、第3次模擬燃料集合体から試験的に取付けられる。この方法は液相が連続相であるかぎり使用可能で、また、前2項で述べたボイド計と組合せれば、液流量の測定も可能である。

燃料棒自体に永久磁石を組込むことにより、流れを妨害しないようにすることも検討している。

4-3-6 炉心計測点

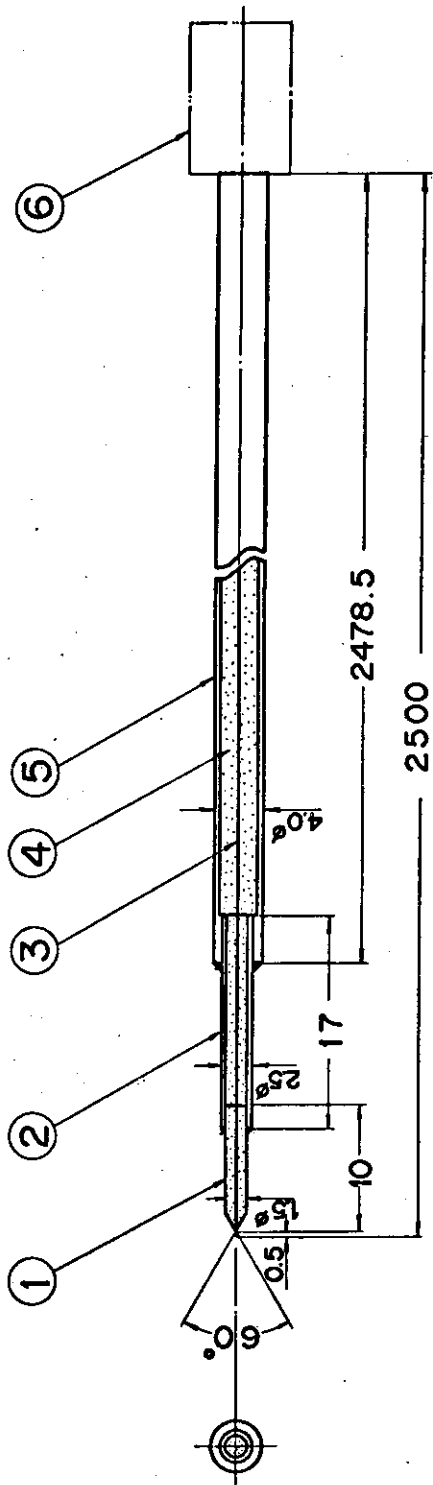
Table 10 に、第1次～第4次燃料集合体における炉心計測点の比較を示す。第5次以後の燃料集合体については、第4次までの使用経験等を考慮して決定する。



10	Moved Pipe	SUS-51
9	Connector	
8	Sleeve	SUS-304
7	Coil	Ni
7	Fin	SUS-304
5	Coil Bobbin	S-45C
4	Spring	"
3	Stopper	"
2	Reducer	"
1	Unheated Rod	SUS-304
No.	Name	Materials

Part A
(s-27)

Fig. 24 Flow Direction Meter



Specification

Temp. : 550 °C
 Press.: 170 kg/cm
 Fluid : Pure Water

No.	Name	Materials
6	Connector	
5	Sleeve	SUS 304
4	Insulator	Al ₂ O ₃
3	Lead Wire	Ni
2	Insulator	Fe Ni Co
1	Electrode	Al ₂ O ₃

Fig. 25 Probe-Type Void Meter

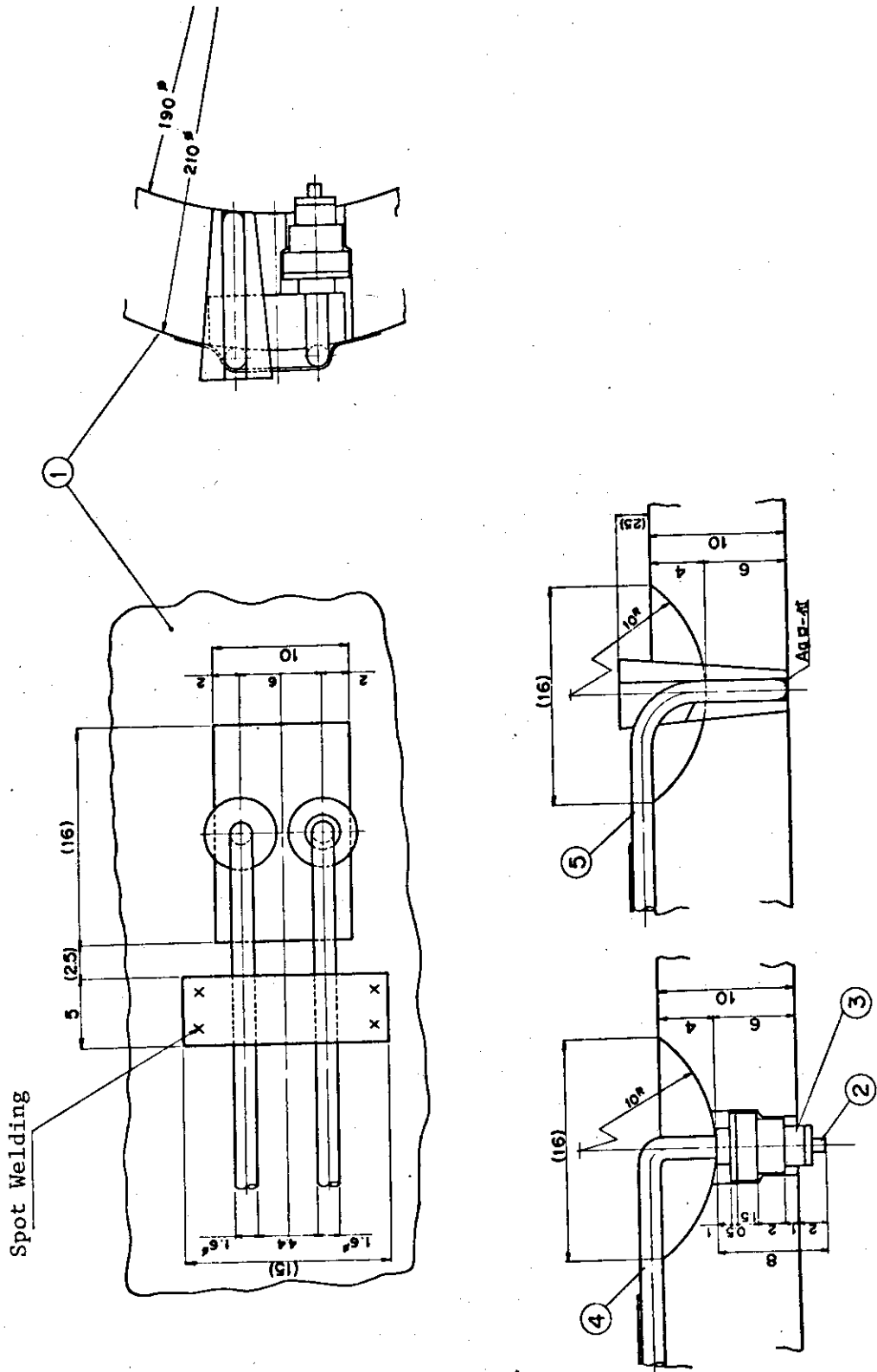


Fig. 26 Probe-Type Level Meter

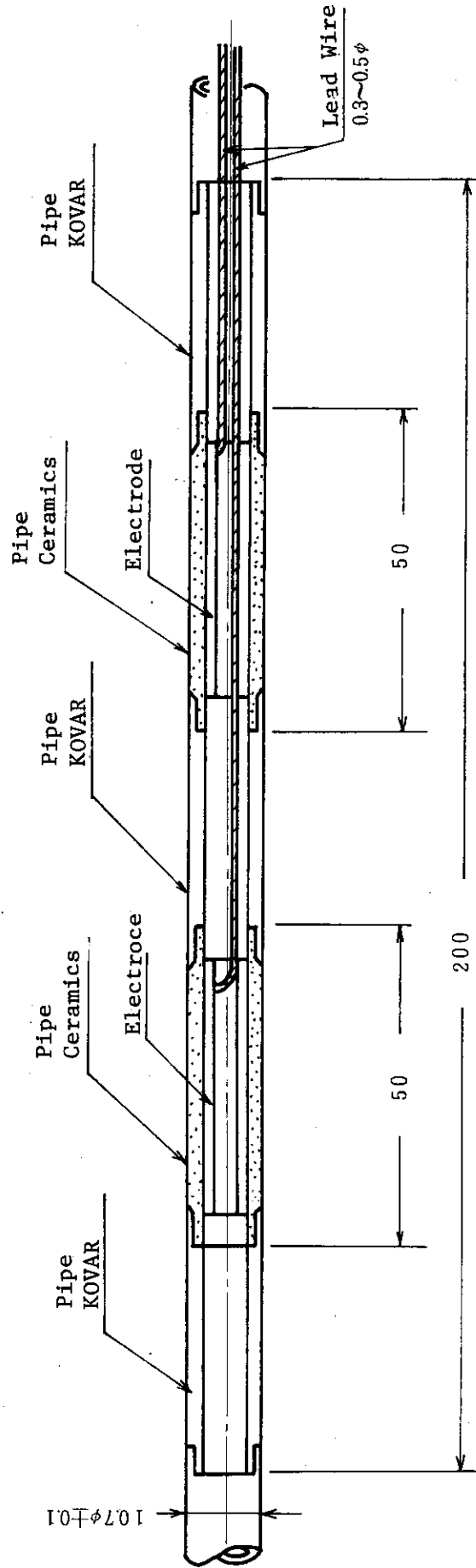


Fig. 27 Capacitance Void Meter

5. 予備解析の結果

5-1 予備解析の目的

ROSA-II 実験において生じた現象が、そのまま実用炉において生じ得るか否かは、模擬した装置の構成が完全に同じでない以上一概には言えない。寸法の違いや質量あるいは保有熱量の違いなどが、どの様に現象の類似性に影響を与えるかを、実験の結果を詳しく分析した上で判断する必要がある。この判断の材料の一つとして現象の経過をコードにより解析した結果が有用である。また解析結果は実験条件を決定する際に参考とするところは、以下ようになる。

- (1) 実験計画を進める上で、簡単には予想できない現象に対して解析結果を参照することにより、無駄なく合理的に実験を進行させる。
- (2) 解析結果を得られた実験データと合せて現象の解明のために用い、現象の定性的な説明とそれが一般的な体系で起こり得る現象か否かの判断の材料とする。なお予備解析の条件と同じ条件で行われた実験のデータが得られた場合には、予備解析の結果は次の役割も果たすことになる。
- (3) 得られた実験データを解析結果と比較検討することにより、その一致性の良否から解析モデルの有効性が評価でき、不十分な点が明らかにになればモデルを改良し、上り一般的に用い得る解析コードにする。多くの場合この第三の目的のためには、実験の条件に合わせた条件で再び解析を行い（「実験解析」と称することがある）、解析コードの評価を行うが、これは実験結果の産出に合わせて行われる予定になっている。

5-2 RELAP-3 による飽和減圧過程の予備解析

5-2-1 解析の対象範囲と入力条件

ROSA-II 試験の目的については、3章で述べられた通りであるが、そこであげた三種の実験内容 (Table 2) のうち、解析の対象としたのは「実用炉を模擬した実験条件」と「より有効な ECCS の注入方法を調べる実験」に対応した解析のみで、「個々の条件の影響度を明確にするための実験」は含まない。その理由は変化させる実験条件が、原則的には無数にあることによる。そこで解析の条件範囲は破断条件以外は実用炉個々の値に一応固定して、破断条件の変化の影響を中心に解析結果を検討した。破断条件の変化とは、低温側および高温側配管の破断位置、両端（ギロチン）、片側、部分（スプリット）および配分の各破断形式、それに破断口径の三つの条件の変化である。ただしそれ以外の条件の変化が解釈上重要な場合は、必要な条件を変化させた場合と結果を比較した。

さて本解析で用いた RELAP-3 コードについては、前述の通り、ROSA-I 試験における比較的単純な圧力容器からの水放出過程の実験データとの比較照合により、モデル自体の不完全さはいくつか指摘されている。^{**}
それらを簡単に述べると、

* W. H. Rettig et al. "RELAP 3 - A Computer Program For Reactor Blowdown Analysis"
IN-1321 (June 1970)

** 大西信秋, 傍島 真ら「ブローダウン実験解析による RELAP-3 コードの評価」

- (1) 臨界流の放出係数が一定でなく、特に破断口径によって変わる。
- (2) 気泡分布モデルおよび気泡離脱モデルにおけるパラメータ値は、水面の動きと流出ノズルの高さ関係によってその最高値が変わる。特に気泡離脱モデルにおいては、その高さ関係が近づくと極端な流出クオリティの変化を示し、注意を要する。
- (3) ボリューム構成の仕方によって、多少の計算結果の違いが現れる場合がある。

これらは単純化された実験の結果を単純なボリューム構成で解析することによって、個々のモデルの不完全さが現れ易くなった結果、明らかにされたと言える。逆に ROSA-II 装置のように複雑な構成を、それに応じたボリューム構成で解析した場合、不完全さが現れなくなる可能性もあるので、さらにそういった不完全さが現れ易いボリューム構成によっても解析してみて、結果の違いがあるか否かを検討することが必要である。そこで前述の(2)および(3)に対しては、未来2ループの構成であるのを、破断側が完全なループでなく、直接圧力容器から流出するいわゆる1-1/2ループの構成による計算結果と比較し、検討した、また(1)に対しては放出係数 C_D の値が、ROSA-Iの解析の範囲では0.6~1.2と変わることが確かめられたが、1.0を越えるのは比較的長い時間にわたって低い蒸気のオリティで流出するような場合に限られ、ループを通過して流出するような場合にはまずあり得ないこと、それにUS AECの新基準では0.6~1.0で変化させて解析するよう指定されていることを考え合わせ、0.6および1.0の2通りの場合の解析結果を比較した。

なお解析例の一部には、放出係数のモデルと気泡離脱モデルに修正を試みたコードを使用し計算した。

5-2-2 低温側配管破断の解析結果のまとめ

低温側破断の解析結果の比較検討で明らかになったこと、および実験に対して望まれる点をまとめると以下ようになる。

- (1) 計算結果では健全ループ側に注入されたECC水がダウンカマを通過して直接破断ループへ流出する、いわゆる炉心バイパス現象が見られた。実験ではこの点に注目して、低温側の流出流量がECC注入の時点からどの程度増えるかを測定し、またECC注入のない場合と比較し、破断側に注入される量以上の流量差があるかどうかを調べる。また破断側のみ注入しない場合と比べその凝縮効果によるバイパス流の促進の影響度をみる。
- (2) 低温側にECC水が注入されると、蒸気を凝縮し、炉心の逆流が生じ、高温側のエンタルピの高い流体が炉心に流れ込むため、却って炉心のクオリティが上がってしまう。実験では炉心の流れ方向やボイド率の変化等を測定することが望まれる。
- (3) 燃料棒の熱伝達は破断後の逆流によって、計算上は膜沸騰に移行し、それが持続するとき炉心にECC水が入っても、燃料棒温度が上昇することが示された。これが実際に生じるかどうか、またECC水が入っても冷却されないかどうかを測定によって確かめる必要がある。
- (4) 蒸気発生器の二次側から一次側へ与えられる熱量は、炉心の発熱量よりもかなり大きく、ブローダウン現象への影響は大きいと考えられる。この影響を調べるためには、二次側の温度を一定に保った場合と一次側と併行して下げた場合を比較するなどの方法があろう。
- (5) 各配管へ注入されたECC水の蒸気凝縮効果により、例えば健全ループ各部の流れ方向が様々なに変動することが示された。解析と実験とで混合の違いやその影響を比較するために、配管内の

流れ方向や水温の追跡などによって挙動を調べる。

- (6) 放出係数の変化または破断口径の変化は、調べた範囲では流出流量や炉心流量の挙動が、かなり相似的になっている。炉心露出は流出流量の多い方が早く現れ、しかも早くACCが注入されることになる。実験では破断口径を種々変えて行い、露出時間を比較する。
- (7) 1-1/2ループ構成では流出経路の抵抗、容積、熱源がないため、高温側からの流出流量が多くなり、また圧力容器内の水面変化の影響がその流出流量に直接現れる。その様なループ構成で行っている他所の実験（例えば米国 LOFT - Semiscale Test）等と結果を比較する。
- (8) 両端破断、片側破断、部分破断のそれぞれ口径 37.5 mm および 30.5 mm の解析結果を比較すると、その中で炉心状態にとって最悪条件と考えられるのは、部分破断の 30.5 mm であった。更にその場合の炉心流量をより小さくするような破断面積の配分を行った配分破断では、一層悪条件となり得ることが分った。その口径は高温側経路が 16.5 mm、低温側経路が 25.0 mm でその配分は 3対7である。これらの種々の破断形式において実験を行い、最悪の結果を比較決定する。
- (9) ECCS の最適注入条件は、蓄圧系を上部プレナムに、低圧系を下部プレナムに注入する方法であることが解析上明らかにされた。これを実験的に調べ、燃料温度の挙動の上で実際に冷却効果が現れるか調べる。またあらゆる破断条件に対して有効かどうか調べる。

5-2-3 高温側配管破断の解析結果のまとめ

高温側配管破断の解析結果の比較検討で明らかになったことのうち、低温側破断に見られなかった特徴的なこと、および実験に対して望まれる点をまとめると以下ようになる。

- (1) 両端破断でACC注入による蒸気発生器側からの流出流量の増加は、注入量以上ではなく、炉心バイパス現象が生じているとは認められない。その理由は、低温側破断と違って流出径路にある大きな容積の中で注入水が混合し、破断口での流出クオリティが小さくならないことによる。しかしダウンカマや下部プレナムでの凝縮を生じさせ、炉心での逆流を誘発し、上部プレナムの水面をノズル以下に一時的に下げたため、上部プレナムからの流出流体のクオリティが上がる。これらの現象を実験で確かめるには、流出流量および流出クオリティのほか、上部プレナムおよび炉心の水面変化の測定を行う。またECCありとなしとで挙動を比較する。
- (2) 配分破断において蒸気発生器側からの破断面積を小さくして行くと、破断後の炉心流が逆流から順流へ移行する。丁度零流量になるのはほぼ1対2に絞った場合であることが示された。また両端最大破断では逆流が再び順流になり、ECCの注入があるとまた逆流が引き起こされることが示された。その外いずれの破断条件の場合も高温側と低温側にHPCI, LPCIが注入開始されると、炉心流は振動する。これらの現象が実際に起こるかどうかわかるために炉心の流れ方向および流量を測定する方法を開発する。またその流れの変化に伴う炉心内のボイド率の変化等も測定法を考案する。
- (3) ACCのみによる炉心の冷却効果はいずれの破断条件においても少なく、低温側破断と同様に注入水の凝縮作用のため炉心露出が生じ易くなる傾向がある。また露出の解消は下からの流れ込みによる水面上昇によって行われ、LPCIの高温側での凝縮作用により引き起こされることを示している。その点は低温側の最大両端破断でLPCIの上からの流れ込みにより露出解消が行われたのと異っている。この測定のためには炉心内の水位変化や燃料棒温度の多数点の測定法が

必要とされる。

- (4) 特殊な場合として蒸気発生器側の片側破断では著しい蒸気滞留（スチーム・バイディング）現象が現れた。極限的な現象として解析コード評価のために実験を行うことが要求される。
- (5) 各種破断条件の中で、炉心温度上昇に寄与するDNB発生の可能性と露出の持続時間を考え合わせて、最悪となる破断条件は蒸気発生器側の破断口が25 mm，圧力容器側が37.5 mmの配分破断である。その面積配分はほぼ1対2である。これに近い配分において実験を行い同様な現象が観測されるか確認し，温度上昇を測定する。
- (6) ECCSの最適注入条件は，蓄圧系を上部プレナムと下部プレナムに同時注入し，低圧系を下部プレナムに注入する方法である。低温側破断と違って，上部プレナムのみ注入したのでは，破断口が近いので直接流出してしまうため，下部プレナムにも注入し，上部の凝縮作用によって吸い上げさせるものである。この上下の注入流量比は実験的に定量化する必要があり，あらゆる破断条件に対して最適な値を決定しなければならない。

5-3 DEPCO - MULTI による未飽和減圧過程の予備解析

5-3-1 概要

加圧水型炉1次冷却系配管破断事故時の1次冷却水の未飽和減圧過程を解析する計算コード，DEPCO - MULTI，をすでに開発し，その信頼性についてROSA - I，LOFT Semiscale 500，600，700および800 Seriesの実験データを解析することによって確認した。本文ではこれら実験データの解析に続いてROSA - II実験に対する予測計算を行なったのでその予測計算結果を報告する。

なお計算コード，DEPCO - MULTI，の理論背景，コード仕様，入力データ仕様などの詳細はすでにJAERI-M 5623に報告したのでこれを参照されたい。

5-3-2 計算モデル

ROSA - II実験装置の1次冷却系内の冷却水の未飽和減圧過程を計算するため，模擬炉心やコアバレルを含む圧力容器，蒸気発生器と循環ポンプを有する健全ループ，蒸気発生器と循環ポンプと急速破断機構を有する破断ループ，および加圧器を含む1次冷却系を65の結接点（ジャンクション・ポイント）により66の部分（レッグ）に分割し，さらにこれらのレッグに5 cmのメッシュで約2,200のメッシュ点を定義し，それらメッシュ点上の値を計算した。なお計算に必要な各種の寸法はROSA - II実験装置の完成図の値を使用した。

5-3-3 予測計算結果と考察

計算は最も代表的な場合として，低温側配管に設けた急速破断機構の破裂板1が破れるいわゆる部分破断について，オリフィス口径3.05 mm ϕ （28.3%配管面積比），1次冷却水の初期圧力および平均温度はそれぞれ15.7 kg/cm²abs. および308°C，冷却水の初期流量は健全ループおよび破断ループ共ほぼその標準値である1350 l/minの条件で行なった。このときの計算は，すでに述べた約2,200のメッシュ点について破断後200 msec. まで行なった，このときの時間ステップ数は約4,000で計算に要した時間はFACOM 230-60で約6,600 CPU秒であった。

Fig. 2.9 ~ Fig. 3.5はこの計算で求めた1次冷却水の圧力変化をそれぞれ，圧力容器上部プレナム内，破断オリフィス上流，破断ループ高温側配管と循環ポンプ吸込側配管，および健全ループ高

温側配管，循環ポンプ吸込側配管と低温側配管の位置で示した。

Fig. 30, Fig. 31およびFig. 32にみられるように破断ループでは破断オリフィス直上流部は勿論，その高温側配管および循環ポンプ吸込側配管でも激しい圧力振動が予想される。しかしFig. 29, Fig. 33, Fig. 34およびFig. 35にみられるように圧力容器内や健全ループの配管各部では激しい圧力振動は予想されず中程度の圧力振動（圧力振巾で 5 kg/cm^2 程度）を伴いつつ圧力は降下する。

Fig. 36とFig. 37はそれぞれコアバレルおよび炉心に作用する圧力差を示したもので，Fig. 36ではコアバレルの内圧を正圧力に，Fig. 37では炉心の下方より作用するのを正圧力として示してある。これらの図にみられるようにコアバレルおよび炉心に働く圧力差はそれぞれ 10 kg/cm^2 と 5 kg/cm^2 程度である。またその周期も比較的長い。

Fig. 38は模擬炉心における冷却水の流速停止や逆流が明らかに予想される。ROSA-II模擬炉心における未飽和減圧過程でのDNB発生についてはこのような流速停止や逆流の周期と共に燃料棒熱流速等を考慮して検討する必要がある。

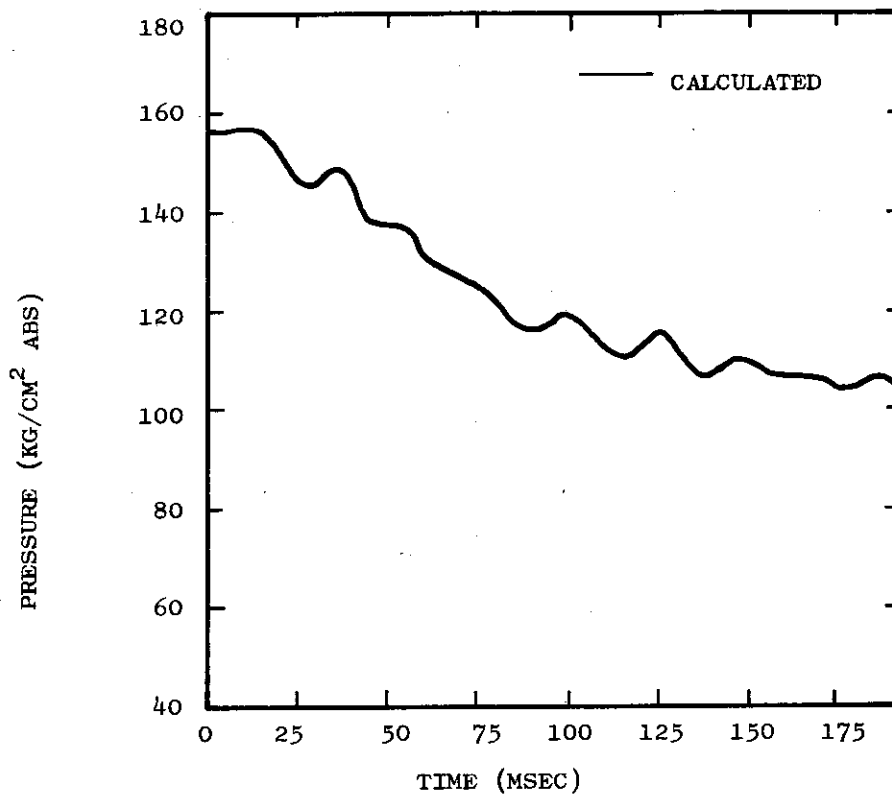


Fig. 29 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (1)

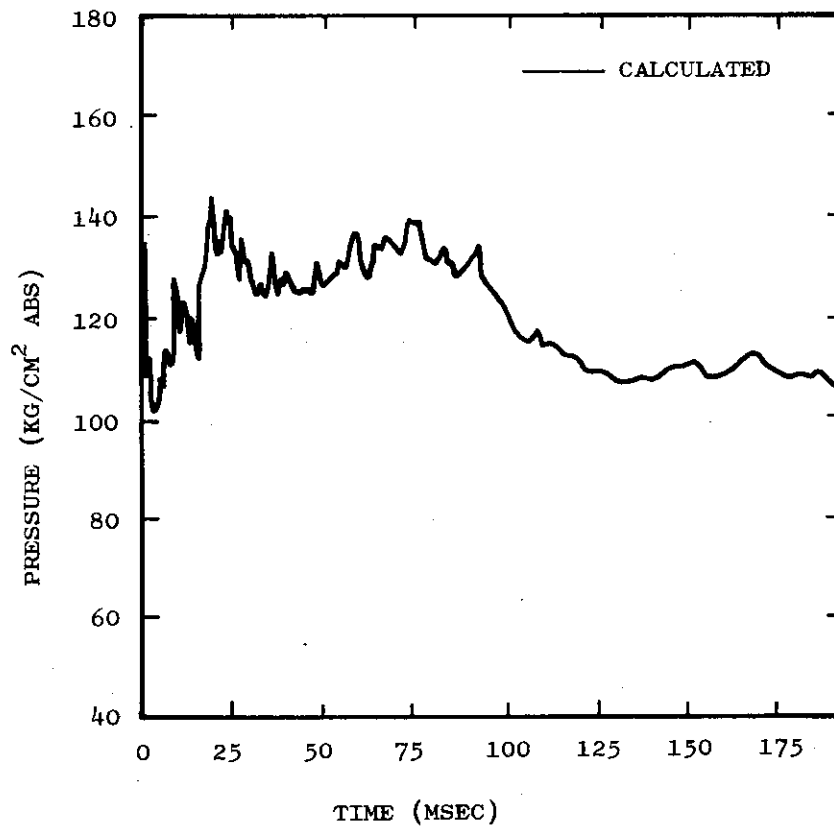


Fig. 30 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (2)

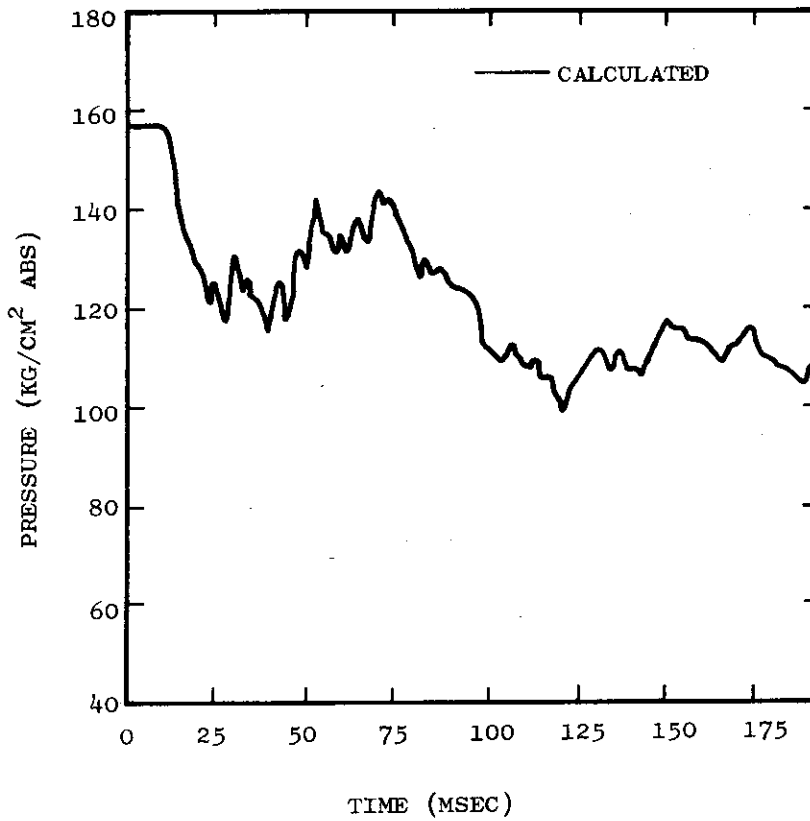


Fig. 31 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (3)

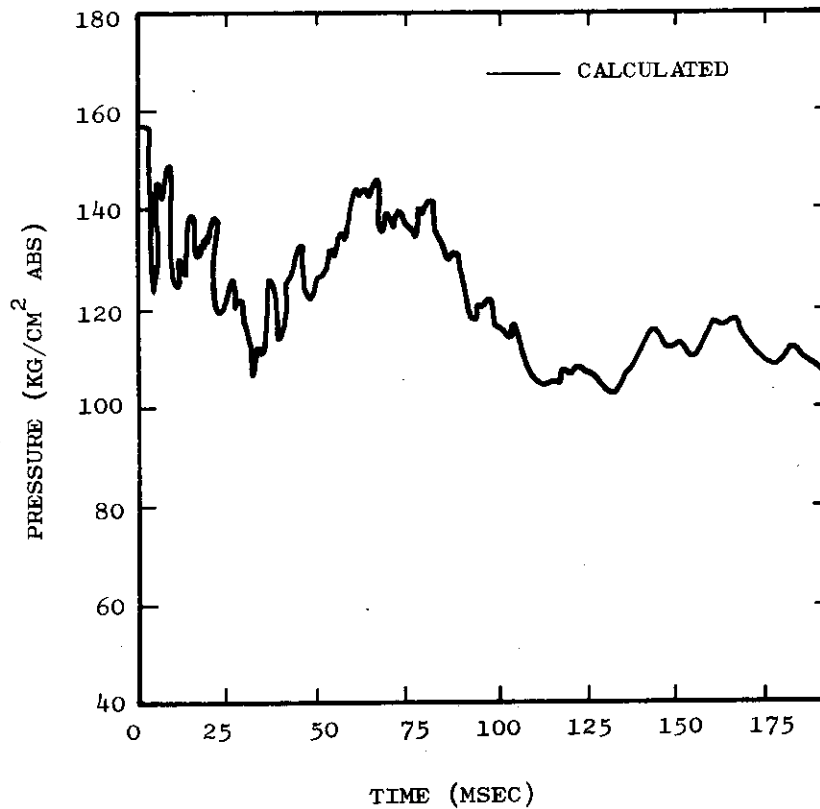


Fig. 32 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (4)

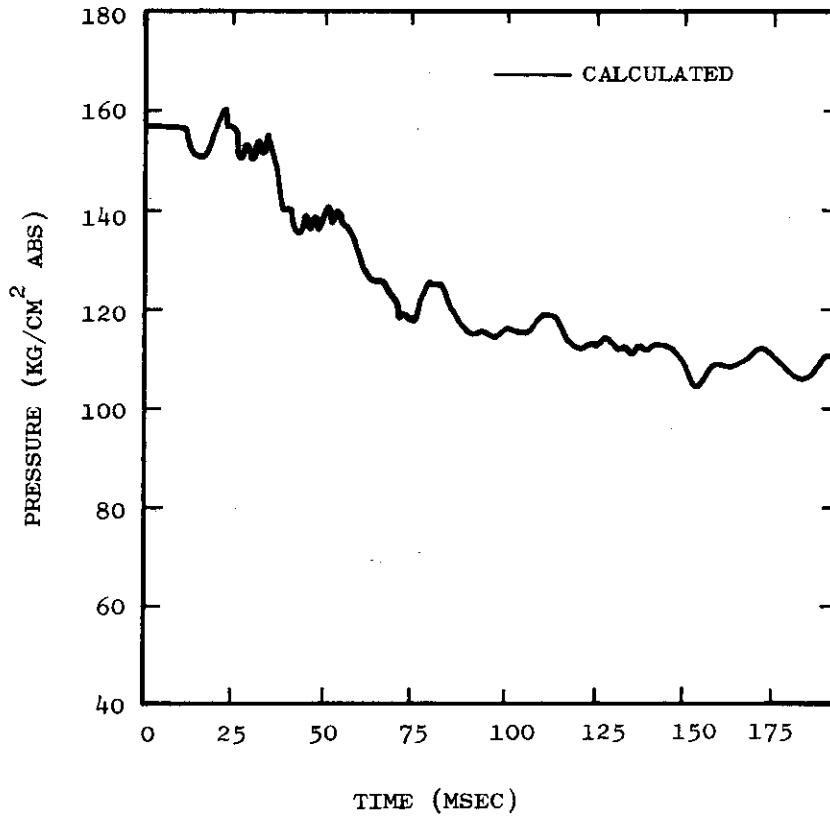


Fig. 33 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (5)

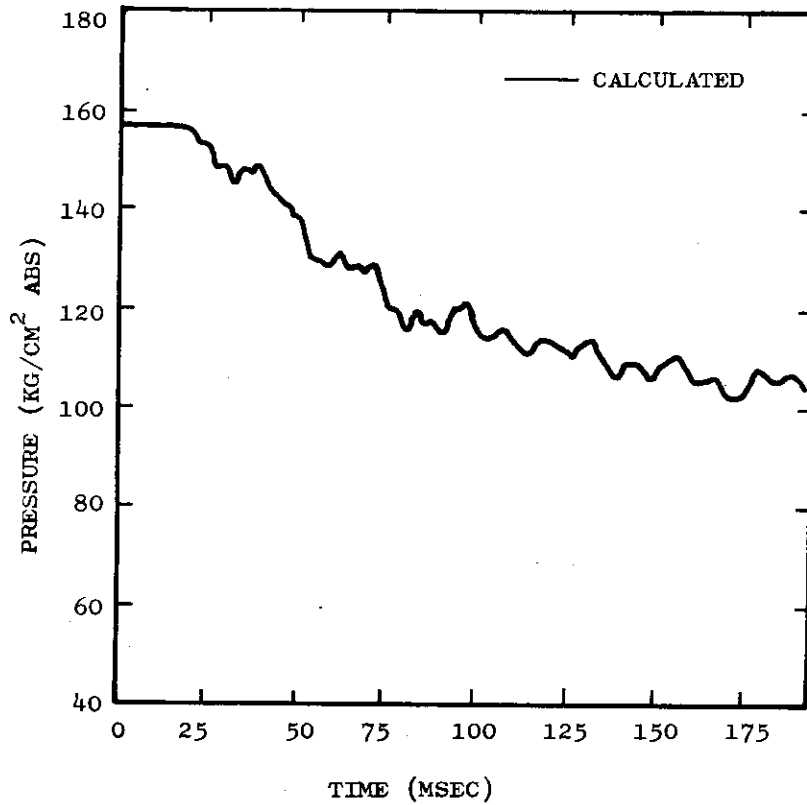


Fig. 34 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (6)

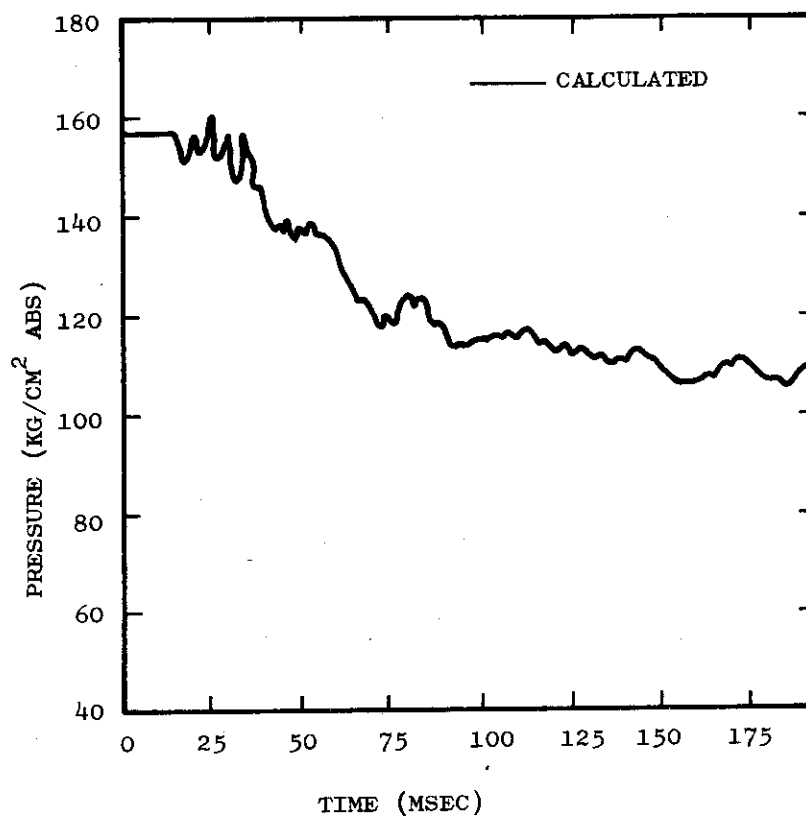


Fig. 35 Pressure Transient Calculated by DEPCO-MULTI Code (7)

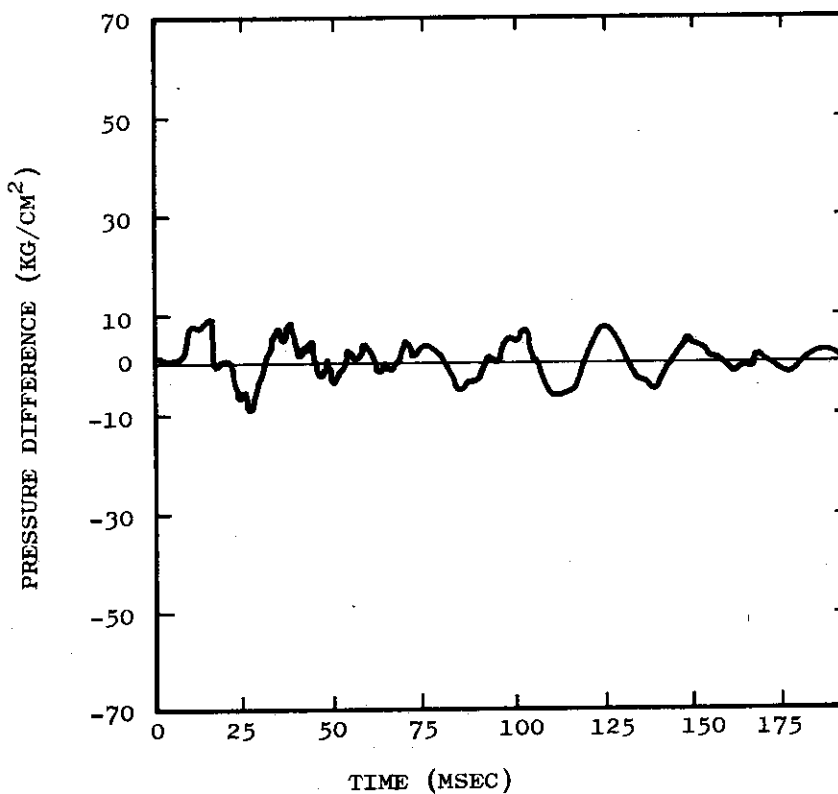


Fig. 36 Pressure Difference Transient across the Core Barrel

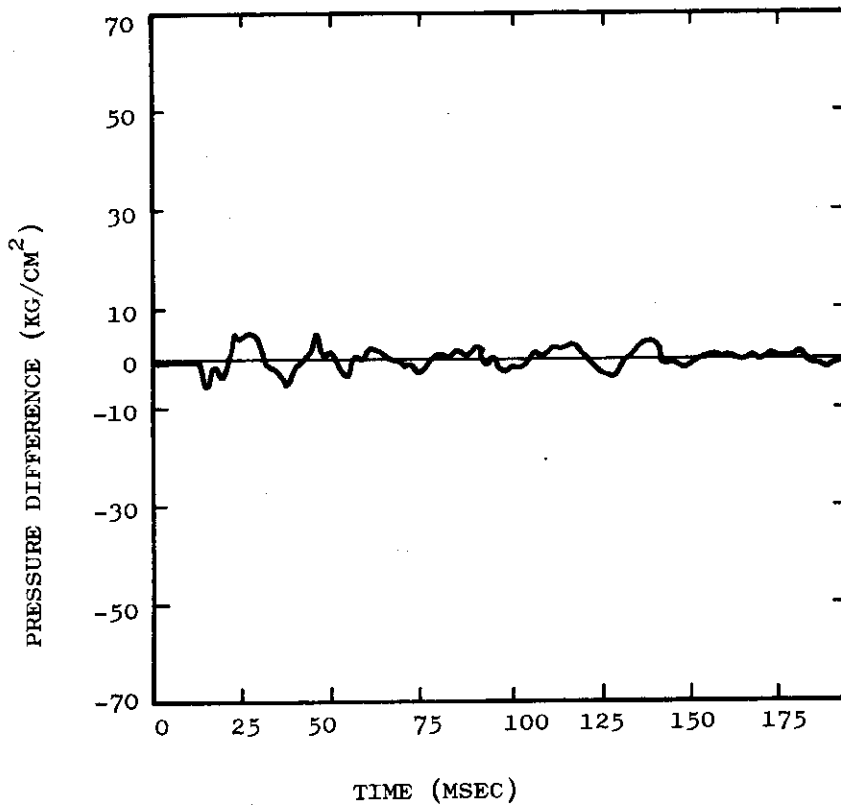


Fig. 37 Pressure Difference Transient across the Core

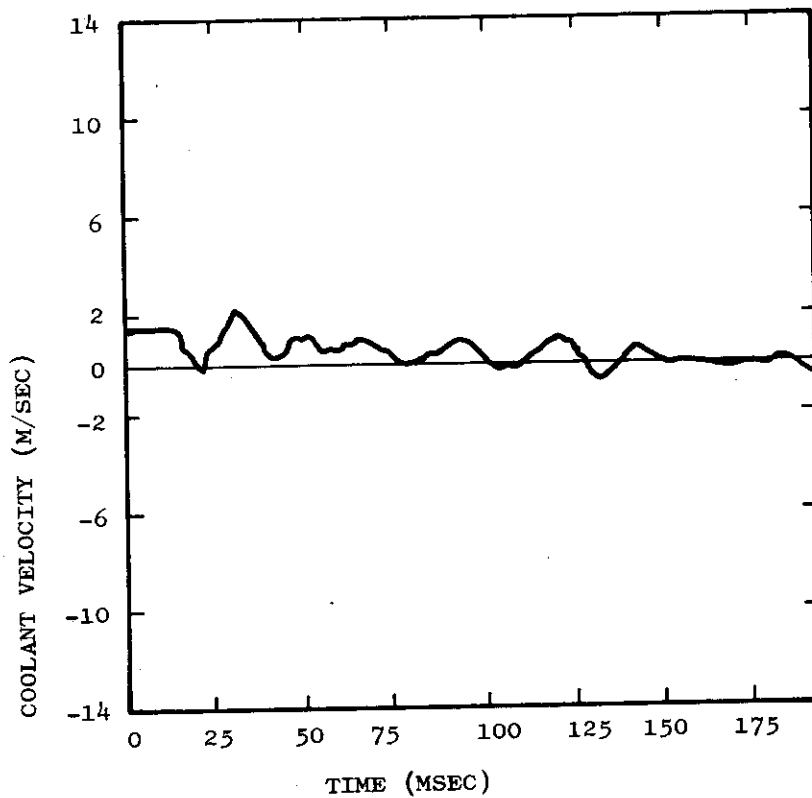


Fig. 38 Coolant Velocity Transient in the Core

APPENDIX

I 低温側配管破断の結果と考察

低温側配管破断の特徴として破断箇所からダウンカムに至る径路は短く、反対の上部プレナムに至る径路は長い上に循環ポンプや熱交換器を途中に通ることである。そのことから上部プレナムに溜る蒸気が流出しにくく、従って圧力が下がりにくいために、より多くの水がダウンカム側から流出し易いと考えられ、炉心の冷却に対してはより危険性の高い破断箇所であると考えられている。そこでまず ECCS がどのような効果をもつかを大破断について解析し、次に最悪の破断条件を追究することを中心とした解析を行った。その際 RELAP-3 コードのボリューム構成の仕方の影響も検討するため、言わゆる 1-1/2 ループ構成との挙動の違いに目を向けた。

I-1 ECCS 注入の有無による比較

まず低温側配管破断に対して ECCS の注入がどのような効果をもつかをみるために、注入した場合としない場合の挙動の違いを比較した。この場合放出係数の値を、既に述べた理由から 0.6 と 1.0 の二通り用いて、それぞれ比較した。経験的に 0.6 の方が実験結果に近いことが知られているので、0.6 の結果を中心に述べよう。

圧力の変化 下部プレナムの圧力を比較すると両者で違いが生ずるのは、蓄圧系の注入開始圧力である 4.57 kg/cm^2 に下がった 1.3 秒 (9 秒 = 放出係数 1.0) 付近である。そして大気圧付近まで下がる時間は ECC なしが約 4.0 秒 (3.0 秒) に対し、ECC ありが約 3.0 秒となっている。後者は大気圧以下まで下がっているが、それは 100°C 以下の水が注入されて蒸気が凝縮されたため、計算では破断口からの逆流を許していないからである。(Fig. I, 2)

流出流量の変化 両端破断の二つの流出径路のうちダウンカム側からの流出流量が、注入ありとなしとでかなり異なる。(Fig. I, 3) ECC の注入される方は 1.3 秒 (9 秒) から数秒間流量が増加し、ECC なしの場合より流量が大となるのは、配管に注入された水が直接流出するためであるが、破断ループ側配管に注入される水量は 2 kg/sec 程度であるのに対し、流出流量の差は 5 kg/sec にも及ぶ。圧力的には注入ありの方が低くなるのに、注入量以上に流出流量が増えているのは、健全ループ側配管に注入した水をも伴って流出する。いわゆる炉心バイパス流現象が生じているためと見ることができる。ちなみにこの流出クォリティを 1.6.0 秒にて比較すると、注入なしが 0.133 に対し、注入ありは 0.028 と極端に低くなっている。またその流量の過大な分が確かに健全ループ側からの水によるものであって、下部プレナムの方から来たものでないことは、下部プレナムからダウンカムに流れ込む流量が、むしろ注入ありの方で少なく計算されていることから結論づけられる。

炉心流量の変化 炉心流量は破断後の未飽和減圧によって、炉心上下の圧力差が逆転するため逆流になる。(Fig. I, 4) しかし注目すべきことは、上部プレナムの圧力が 0.1 秒以内に飽和圧力まで落ち込んでいるのに対し、下部プレナムの圧力はそれに数秒要していることが、計算結果で示されている。つまりその時点まで下部プレナムでは未飽和状態に圧力が維持されていることになる。そうなれば炉心上下間に両者の温度差に相当する飽和圧力差ほどの圧力差は生じないことになるが、実際の現象でもそうなるか検討の必要があろう。ところでこの逆流は、上部プレナムから破断口への流出クォリティが高くなって、下部プレナムより減圧が速くなる頃から解消し、次第に順流に戻っている。この場合の上部プレナムからの流出クォリティを決定するのが、気泡離脱モデルである。ECC

注入があると、再び逆流になるが、これは注入水が下部プレナムまたはダウンカマ部の蒸気を凝縮し、減圧する効果をもつためである。

また2.5秒から注入ありの方は、高圧・低圧系が高温側に注入されるので、再び急な順流の誘発があって振動する現象が計算されているが、実験的にも考えられる。

炉心の平均クォリティの変化 炉心内の蒸気重量率（クォリティ）の時間変化を見ると、蓄圧系からのECC注入開始時点までは全く両者で変わらない。（Fig. I, 5）しかしその後注入ありの方が2.4秒にて0.3まで上昇し、再び下降している。この理由はまずECC注入によって下部プレナムおよびダウンカマ部の凝縮が起これ、炉心の逆流が生じて、上部プレナムの水、続いて蒸気が炉心内に流れ込んだためである。しかし他のECC系統が高温側にも注入し始める2.5秒以後は、炉心流は順流勝ちになり、急に炉心のクォリティは下がって、注入なしの場合よりずっと低くなっている。放出係数1.0の方はそこまで計算されていないが、2.5秒までにかなりクォリティは高くなっている。しかしその時点では既に圧力が大気圧近くに落ち、ブローダウンは終了している。その場合注入した水は、もはや流失しないはずだから、炉心冷却部は行われやすくなる可能性もある。

蓄圧系注入流量の変化 注入開始後、蓄圧器と一次系との圧力差は、一次系の圧力低下によって増えるため、注入量は増加し、まもなく極大となっている（Fig. I, 6）注入量のすべてがなくなる時点での蓄圧器内圧力は 11 kg/cm^2 である。この曲線は破断ループおよび健全ループそれぞれの注入流量の極大値が、実用炉の予測値と等価的になるような抵抗係数を試算により選んだ結果である。

その他 ECCの有効性を調べる際に着目すべき挙動の一つに、健全ループ内の水の流れがある。その流れの挙動によってはECC水の代役を果す可能性が高く、またECC注入後はその挙動は複雑になることが想像される。計算結果ではECC注入開始前は、大まかに言って、加圧器と蒸気発生器の片側の水は上部プレナム方向へ流出し、蒸気発生器のもう一方の側からは逆向きにダウンカマ方向へ流出している。流量は後者の方が前者のほぼ2倍である。その後蓄圧系の注水が始まると、その注入水は低温側配管からダウンカマの方へ流出するのが大部分である。次に高温側配管にも低圧系が注水を開始する時からは、健全ループ各部の流れ方向が様々に変動し、時間によってダウンカマからループ内へ逆流している。この様なことが生じる原因の一つに、冷水の注入場所における蒸気の凝縮が考えられるが、計算モデルでは1つのボリューム内では完全混合となるために、瞬時に凝縮が行われることになる。それが圧力の急変と流れの加速をもたらすために流動の変化が著しくなる。実際の現象では混合の速さが体積の大きさによって緩慢になることが考えられるので、流れの変化も緩くなるかも知れない。その影響の程度を解析と実験とで比較することは重要である。

流動状態の変化に影響を与える別の要素として、蒸気発生器内での吸熱または発熱がある。2次系温度を一定としたので、1次系温度が2次系温度より高い間は吸熱源であるが、1次系の方が低くなる時点からは逆に発熱源として作用するようになることが、図の吸熱量曲線が下降に変わることから分かる（Fig. I, 7）。図示した例はECC注入なしの場合であるが、この発熱速度は炉心の発熱速度（例えば20秒にして 5 Kcal/sec ）よりもほとんどの時間においてはるかに大（例えば20秒にて 50 Kcal/sec ）で、1次系の挙動に与える影響度は炉心の発熱よりもずっと大きいと推測される。

I-2 ポリウム構成の違いによる比較

同じ実験装置に対して違ったポリウム構成で解析した結果を比較することにより、解析コード自体のポリウム構成に対する依存性がまず検討される。その上で明らかに解析コードの問題でない判断できる違いがあれば、現象の違いとして検討することが必要になる。そこで二つのループを一つにまとめたポリウム構成による解析結果を検討してみた。この構成が2ループ構成と異なる点は、破断口までの流動抵抗がかなり小さくなること、途中の蒸気発生器通過による熱の授受がないこと、そして途中に容積がないので圧力容器内の状態が流出状態に直接影響することである。米国のLOFT実験で採用されている、このような通称1-1/2ループと呼ばれる構成の実験装置では、抵抗係数は調節できるが、蒸気発生器における熱の授受と、流出径路にある容積ポンプは模擬されず、それらがどの程度現象に影響するかを明らかにする必要がある。その意味でこの解析結果は、ROSA-II装置が仮に1-1/2ループ構成だったら、どう異ってくるかをも示すことになる。(Fig. I, 8)

この構成による解析では、 $C_D = 1.0$ とし、先の2ループ構成のECCなしの結果と比較した。

圧力の変化 両者の圧力変化は1-1/2ループの方がやや早めに減少する程度で、その差は最大時点でも 4 kg/cm^2 である。5秒前後に微小振動が見られるが、水面変化の影響によるもので、以下で詳しく述べる(Fig. I, 9)。

水面の変化 上部プレナムの水面の変化を見ると、約3秒で破断口ノズルの高さまで下がっているが、その後蒸気流出になりかけて再び減圧沸騰が盛んになり、あるいは他のポリウムから水が流れ込み、そのため水面が上がって再び二相流の流出になるという振動をくり返す(Fig. I, 10)。この原因となる流出クォリティの評価法はモデル上の不完全さの一つであるが、水面とジャンクションの高さが近いときに現れる。

流出流量の変化 前述の水面振動のために、流出流量も対応して振動している(Fig. I, 11)その平均線を見ると、ダウンカマ側(Break 1)からの流出流量は急変することなく減少しているのに対し、上部プレナム側(Break 1)からの流出流量は、二相流から蒸気流に完全に移行する時から急減している(Fig. I, 12)。このように流出径路に容積がある場合に比べて、流出状態の変化が激しくなるのが特徴である。流出流量の比較では、低温側径路の方は両者で大差はないが、高温側径路の方はかなり1-1/2の方が多くなっている。それは流出径路に流動抵抗による減圧がなく、蒸気発生器からの受熱もないために、流出クォリティは低いまゝで、従って多く流れることになる。

その他 以上の比較から1-1/2ループ構成では2ループ構成と挙動が異なり、特に高温側からの流出流量が異なることが明らかとなった。この結果圧力はやや速く減少する程度に過ぎないが、系内の水量がかなり速く減少することになり、炉心の露出が早く現れる。従って流出径路にあるべき抵抗や容積、熱源が流出状態をどう支配するかによって、炉心の露出状態などに影響を及ぼすことが明らかで、2ループの実験でもそれらが重要な因子である。それを実験的に調べる場合、装置の設計条件の決まっているものは変数にし得ないので、代わりに流出状態を破断面積で調節する方法が考えられる。この破断形式は両破断口の面積を違えて配分するので配分破断の名で呼ばれる。

I-3 最悪破断条件の追究

低温側破断のなかで炉心の状態が最悪となる破断条件を決定することは、実験・解析ともに重要である。すなわち最悪状態においても、炉工学的に安全性が確保され得ることが必要とされるからであ

る。そこで種々の破断条件に対する挙動を解析し、それらの比較から最悪破断条件を推測することをを行った。破断形式の種類は両端破断（ギロチン）、片側破断、部分破断（スプリット）、のほか前述の配分破断が考えられる。これらに対して比較的大口径の破断の解析を行った。（Fig・I, 13）

両端破断（Double-ended break）37.5/37.5, 30.5/30.5 mm

片側破断（Single-ended break）0/37.5, 0/30.5

部分破断（Split break）37.5, 30.5

配分破断（Distributed break）16.5/30.5, 16.5/25.0

何通りかの破断形式について解析を行って、その比較から、最悪の事故条件を決めることは、この種の解析コードの計算結果からでは単純にいかない。その一例として炉心のモデルを考えてみると、炉心領域を一つのボリュームで表わした場合、その中の水量や水温、あるいは燃料棒温度はそれぞれ平均的な一つの値で表わされ、局所的な水温や温度を表現できない。従って燃料棒上部が水面から露出して温度が上がり始めるような過程を詳しく解析するためには、それだけ炉心領域をこまかく分割しなければならない。また、炉心の温度については熱伝達という観点からみても、ブローダウン中は様々な流形に変化するはずであり、それぞれの流形に対応した熱伝達の式を用いるのでなければ、妥当な燃料棒温度の計算結果は出ない。しかるに本コードではDNB後の膜沸騰の熱伝達の式に、低圧における流れに対する Dougall and Rohsenow の式のみを適用し、高圧や流れのない場合あるいは蒸気中に露出した場合などが区別されていない。特に当式では熱伝達率を流量の関数の形にしているため、流量が小さい時の熱伝達率を極端に小さく見積ることになる。その様な訳で燃料棒温度の計算結果は最悪条件の判断の一つの目安にはなり得ても、決定的なものではない。そこで最悪条件の判断のためには、次の様な計算結果を合わせて考慮しなければならない。

- (1) ブローダウン中の炉心の流量
- (2) 炉心内平均クォリティ変化,
- (3) 蓄圧系または他の系統の注入開始時刻
- (4) ECC水が炉心内に充分入ったとみなされる時刻

これらの値を各破断条件について一覧表にし、定量的に比較することができる（Table・I, 1）これらのうち配分破断の Case を除いてC-1からC-6についてのみ比較してみる。まず熱伝達に関する前記の計算上の不備を考慮に入れしないで、単に燃料棒表面温度の計算値だけを比較する限りでは、破断後40秒における温度が最大値になっているのはC-1である。（Fig・I, 14）しかし熱伝達の計算法の不備を考慮し、流体の挙動の面から燃料温度が一層上昇しやすい結果が起り得るかどうかを吟味するなら、別の Case の破断条件がより過酷になる可能性がある。

第1に炉心流量の大きさとその持続時間が小さいほど過酷であると一応考えられる。そこで流量の絶対値を比べるとその最大値はいずれも破断直後にあって、その後ほぼ零流量になる時刻と持続時間を比較すると、最も早いのはC-1、続いてC-6である（Fig・I, 15）。C-1は一旦零流量になったあと間もなく再びかなりの流量が生じているがC-6はずっと遅くに少い流量が生じているにすぎず、より厳しい条件であるといえる。C-6の流量が他に比べて少いのは、炉心を中心にみると高温側を通して流出する体積流量と低温側から流出する体積流量の均り合いが比較的良好に取れて、いわば炉心が系圧力の中立点に近くなっているためと考えられる。このような炉心流量の挙動の違いを燃料棒からの熱伝達のうちでも特にDNBの発生の可能性から考えると、いずれの Case でも破断

直後の逆流の瞬間に、流量の低下のために発生する可能性はあるが、この様な短時間の流量変化中にはDNBは生じないという議論もある。仮にそうだとするなら、その後の流量の大きさやその持続時間がDNB発生の有無を支配することになる。

次に炉心のクォリティ（蒸気重量率）の変化を比較してみることから、燃料棒の露出による温度上昇の可能性を検討すると、次のことが言える。まず炉心のクォリティの最大値は燃料棒がどこまで水面より露出するかに深く関連しており、また露出は前述の炉心流量の低下よりも隔段に厳しい状態であるといえる。解析結果はどのCaseにおいてもかなりの露出が生じるだけのクォリティになっていることを示しているので仮想的な露出の時間を比較する（Fig. I, 16）。また、露出開始時点を一応クォリティが急に上昇し始める時点とみるなら、C-1, C-4を除き、いずれもECCS注入開始時刻に一致している。この理由は前にも述べたように、低温側に注入されたECC水がそこで気泡の凝縮を生じさせ、減圧を引き起こすために炉心に上から下への流れが生じ、既に水が流失している上部プレナムの蒸気が炉心に流れこむためである。このような蒸気の流れ込みは炉心の液面を低下させ、露出を引き起こす可能性が強い。C-1, C-4において約5秒の遅れがあるのは、減圧が速くECCS注入開始が他よりかなり早いために、まだ上部プレナムの水が流出しきらずに多く残っているからである。すべてのCaseについて、まず、ECCS注入による露出の開始から炉心クォリティが最大値になるまでの時間を取ってみると、6~8秒となっている。このような凝縮による炉心逆流の現象が実際に起こり得るなら、ECC水を低温側に注入することは、却って炉心の露出を促進させるので危険となる可能性がある。

次にやはりC-1からC-6までにつき、露出が解消する時点がクォリティが十分小さな値になる時点として比較すると、その時刻はそれぞれのCaseでかなりの差がある。結局仮想的な露出開始から解消までの時間では、最も長いのがC-5の27秒、次いでC-6の26秒、最も短いのはC-4の13秒になっている。C-5の場合は露出開始がECC注入より早く、またC-6より早い、その時の炉心流量は比較的大きい。従って炉心冷却はかなり良くなると考えられるのでC-6の方が悪条件になりそうである。露出がECC注入より先に生じているのはC-2, C-5の片側破断で、蒸気滞留（スチーム・バインディング）によるものである。しかし炉心クォリティの最大値は他の破断形式に比べて大きくはない。その理由は破断ループの高温側への圧力容器出口における流量変化を比較すれば明らかになる。すなわち片側破断ではここを通過して流出する流れがないので、逆に圧力容器へ向かって蒸気発生器内等の水が流れ込み、このため上部プレナムの蒸気滞留は解消されやすい。

これまでに三つの破断形式、両端破断、片側破断、部分破断のそれぞれ37.5と30.5mmの口径についての解析結果のうちで、炉心に対して最悪の状態が決定された。このうちで部分破断の口径30.5mmが最悪となった理由について更に詳しく検討し、それ以上の最悪破断条件がないかを追究してやる必要がある。

両端破断、部分破断のように二つの流出路をもつ場合、それぞれの流出流量の変化が炉心流量に直接影響を与え、その挙動は複雑である。これまで述べたように両経路の摩擦抵抗の違いのほか、途中にある吸熱源または発熱源となり得る蒸気発生器やポンプの減衰中の吐出水頭の効果を考えると、一層流出挙動は複雑になる。解析コードにおけるこれら熱源やポンプ水頭のモデルが、よほど妥当なものでない限り、計算された流出流量や炉心流量が実際と異なる可能性がある。それ故最悪の破断条件あるいは流出流量を探る方法として、もっと直接的に両破断面積を変えることによって流出流量を加

減してやる考え方が生まれよう。それは両破断面積を等しくせず、独立に変化させることによって、流出経路にある抵抗、熱源、容積、水頭などの流出流量に与える影響の代用にすることである。この破断条件は面積を配分して与えることから配分破断の名で呼ばれる。本解析ではこれまで比較検討した各破断形式のうちで最悪条件となった結果をもとに、更に悪条件となり得る配分破断についての計算も行った。その場合面積配分を決めるのに、一つは前記の中から最悪破断条件となった Case ⑥より更に炉心流量を小さくするように流出流量が高温側経路でやや多め、低温側経路でやや少めになるような面積配分としたもの、もう一つはそれより幾分水の流出が多くなるように低温側経路の破断面積を大きくし、より早く炉心の露出が現れるようにしたものの二通りを選んだ。それぞれの破断口径は $16.5/25.0$ mm (面積比 3 : 7) および $16.5/30.5$ mm (同 2 対 7) で、Case ⑦および Case ⑧として前表に合わせて計算結果が比較してある。これによると Case ⑦では期待通り炉心流量が Case ⑥よりも一層少なくなり、その持続時間も短かくてしかも流量の回復もないので一段と悪条件となる可能性を示している。また炉心クォリティ上昇の持続時間も一層長いことから、露出時間の長い可能性を示している。

一方 Case ⑧は水の流出が多い分だけ早く露出が現れており、炉心のクォリティ最大となる時刻では Case ⑥より 6 秒早く、その最大値も遙かに大きい。しかし炉心流量はやゝ大きくて、持続時間も長いのでその間の冷却は比較的良い方と言える。従ってその他の破断形式より特に厳しいとは言えない。

以上を総括すると破断後の炉心流量の点からもその後起る炉心の仮想露出の点からも、最も燃料棒温度が上昇しそうで危険な破断条件は、Case ⑦の配分破断と考えられる。

I-4 ECCS 最適注入条件の追究

低温側配管破断において ECCS の注入条件を標準の注入条件から変え、その効果の違いをみた、その中からより炉心冷却に有効と考えられる注入条件を、最適注入条件として決定した。その場合の破断条件には、これまでの最大両端破断と、最悪条件破断とを選び、それぞれに有効となる最適注入条件を調べた。注入条件の変化は主として各 ECCS の注入位置であるが、高圧注入系は大口徑破断の場合、低圧注入系と同じ頃注入され、注入量はその約 $1/5$ であるので、比較的影響が小さいと考えられるので、注入条件は変化させなかった。解析した注入条件の例のうち主なものを Table I, 2 ~ I, 3 に示す。

注入の有効性を判定する条件は、それによって①炉心流量が多くなる、②炉心クォリティが低くなる、③注入した水が多く残存する、この三点である。

始めに炉心流量の時間変化を各注入条件の場合で比較すると、標準の注入条件である GA-1 に比べて、ブローダウン後期の炉心流量が多いのが GA-2 であることが Fig. I, 17 から分かる。このケースは蓄圧系を上部プレナムに注入しているので、その水が炉心を落下して冷却することを示すものである。蓄圧系を健全ループへのみ注入した GA-4 では、上向きの流れが若干維持されるが、GA-2 より持続時間は短い。GA-3 は炉心をバイパスして流出する水量を少なくするために、注入開始圧力を低くしてみたものであるが、炉心流量は零の時間が長くなった。蓄圧系注入開始前の挙動が互いにわずかに違っているのは、計算モデルで蓄圧器の弁の逆流漏れが生じてしまうためである。この影響は以下にみる他の量にも現れるが、極くわずかである。

炉心内のクォリティ変化を比較すると Fig. I, 18 のようになる。標準注入条件では、前節でも見た通り、蓄圧系注入後に炉心のクォリティが却って上昇する、GA-2ではそれがなく、常に低クォリティで炉心はよく冷却されることを示している。GA-3ではGA-1の傾向を一層著しくする結果になった。

上部プレナムにおける水位の変化でみると、GA-2が他の3例と異り、注入開始後上昇していることが明瞭で、この水が炉心へ落下して常に冷却することになる (Fig. I, 19)。

流出流量の違いは両流出口のうちポンプ側の流出口には余り現れず、圧力容器側の流出口に多く現れる (Fig. I, 20)。流出流量においても最も少いのがGA-2で、注入前の流量の延長線よりも下回っている。GA-1では延長線より上回るのは前節までに見た通りであるが、GA-2でそれを下回るの逆の理由による。すなわち上部プレナムに注入すると、低温側配管に注入した水の分の流量増加がなくなるのみか、上部プレナムで凝縮を生じ、炉心やダウンカマの水を引き付ける作用をもつためである。圧力容器内の残存量の時間変化を Fig. I, 21 でみると、流出流量の少い分だけGA-2では減少速度が遅くなり、流出がとまる時点での残存量を多くする結果になっている。従って炉心の露出量は最も少くなるはずで、引き続き再冠水過程での蓄水量を多くすることになる。

低圧注入系の注入開始後は最大両端破断では、計算上一次系内が負圧になって、信頼性に乏しくなるため低圧注入系の注入条件の変化の影響を調べられるのは、やゝ小口径の場合のみである。そこで前節の最悪破断条件となった例について、低圧注入系の注入条件の影響を調べた。その場合標準注入条件に対し、蓄圧系を最も有効とされた上部プレナムに注入し、さらに低圧注入系の注入位置を変化させた。

残存量 (Fig. I, 22) で示すと、この破断条件でも蓄圧系は上部プレナムへの注入が有効で、さらにその上、低圧系は高温側配管より下部プレナムへ注入した方が有効であることが分かる。すなわち低圧系による再冠水の速度が速く、よりよく炉心を冷却することになる。

以上の比較から最も炉心冷却に有効となるECCSの注入条件は、蓄圧系を上部プレナム、低圧系を下部プレナムに注入する方法である。

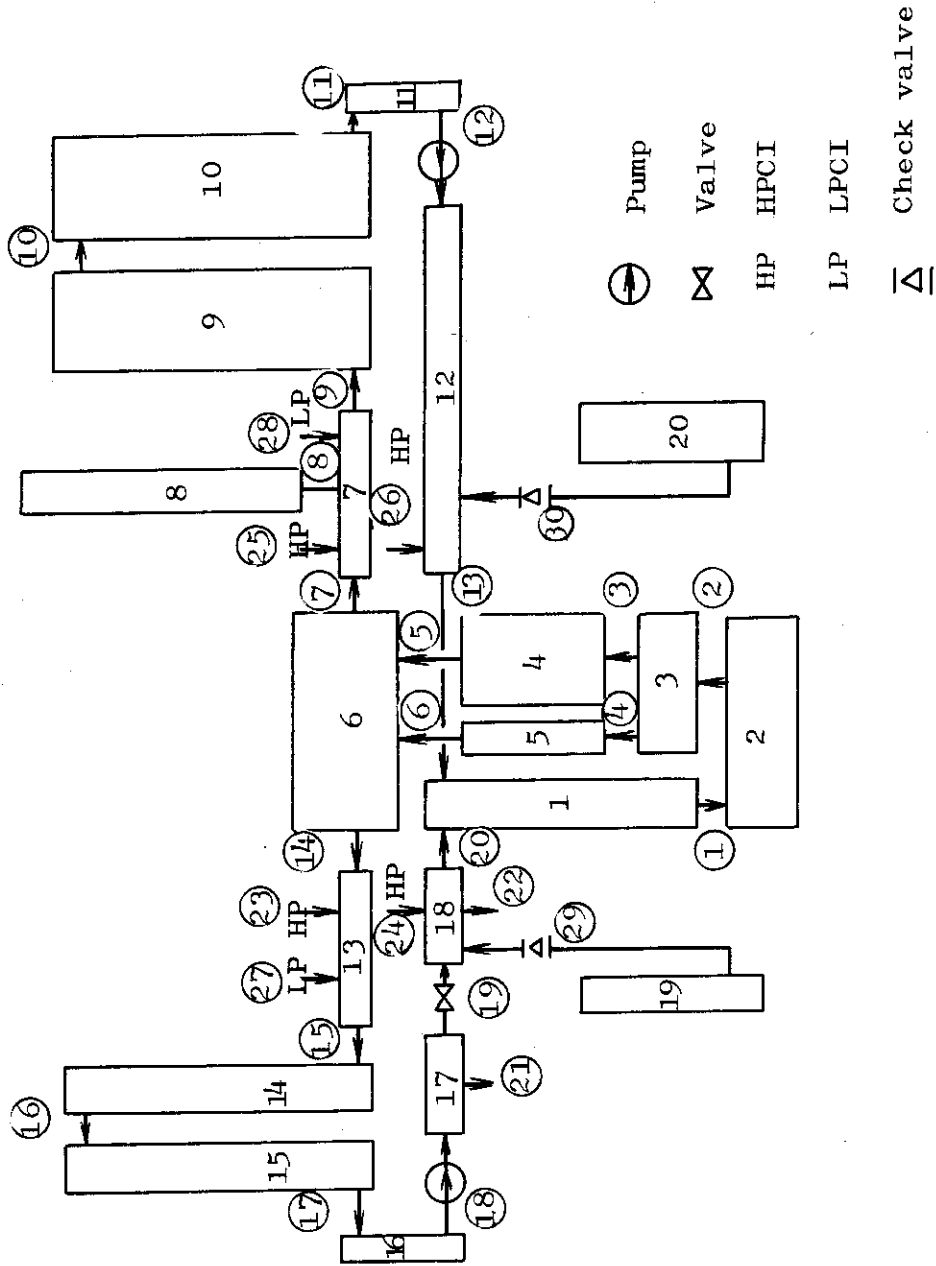


Fig. I.1 M20-30 Representation of cold leg break with ECCS

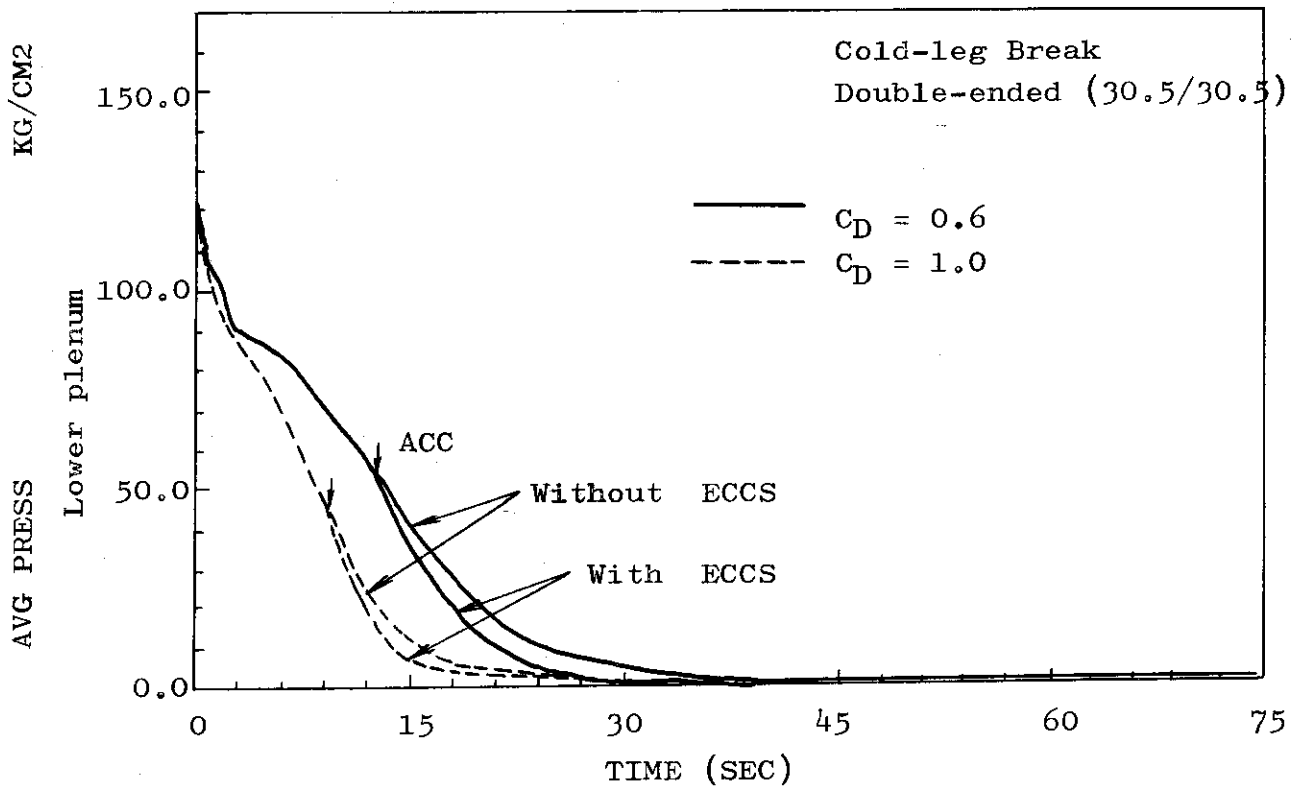


Fig. I.2 Average Pressure in Lower Plenum with and without ECC Injection

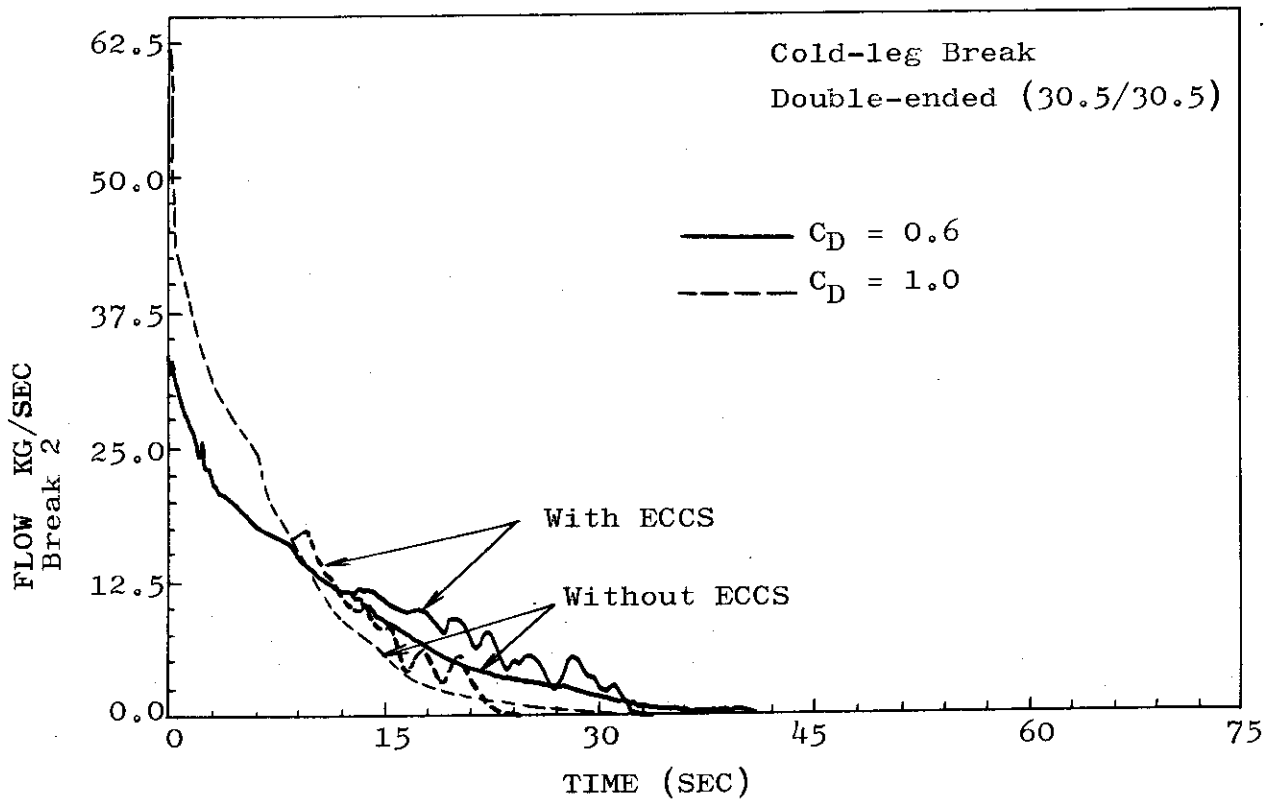


Fig. I.3 Flow from a Break with and without ECC Injection.

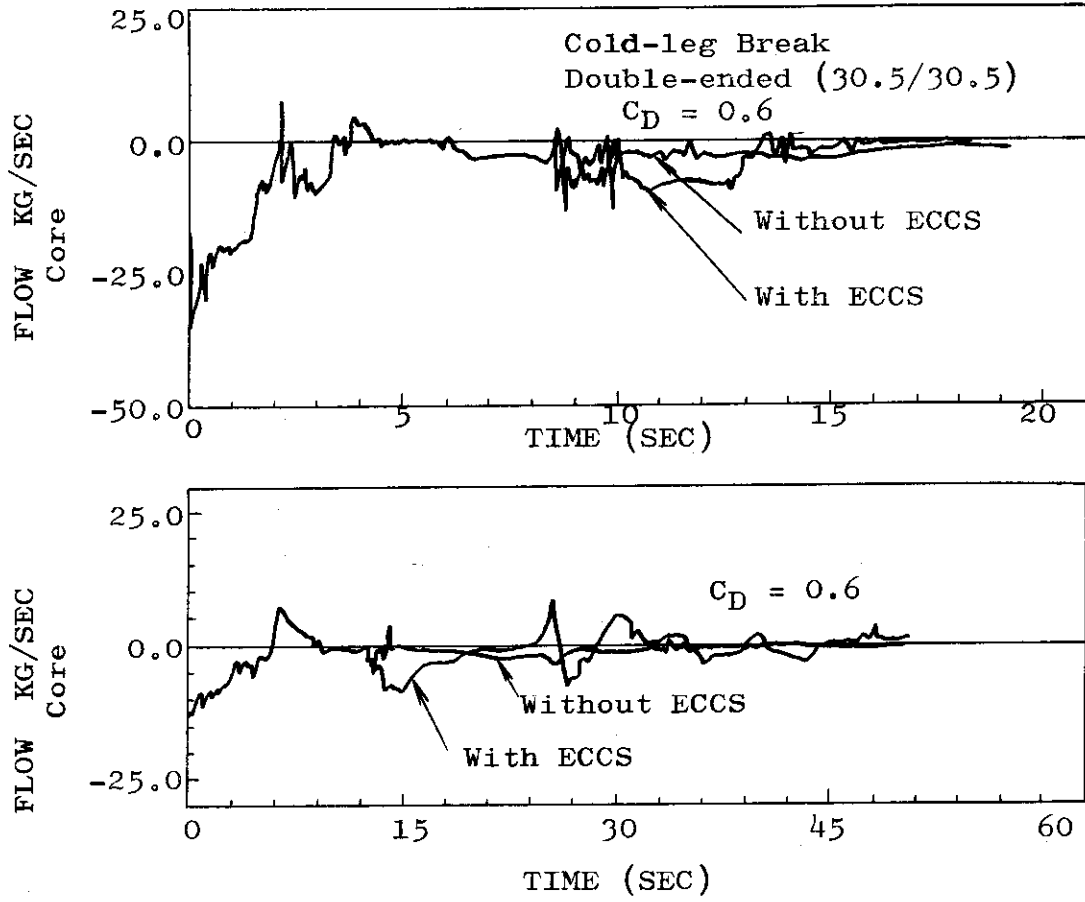


Fig. I.4 Flow at Core Inlet with and without ECC Injection.

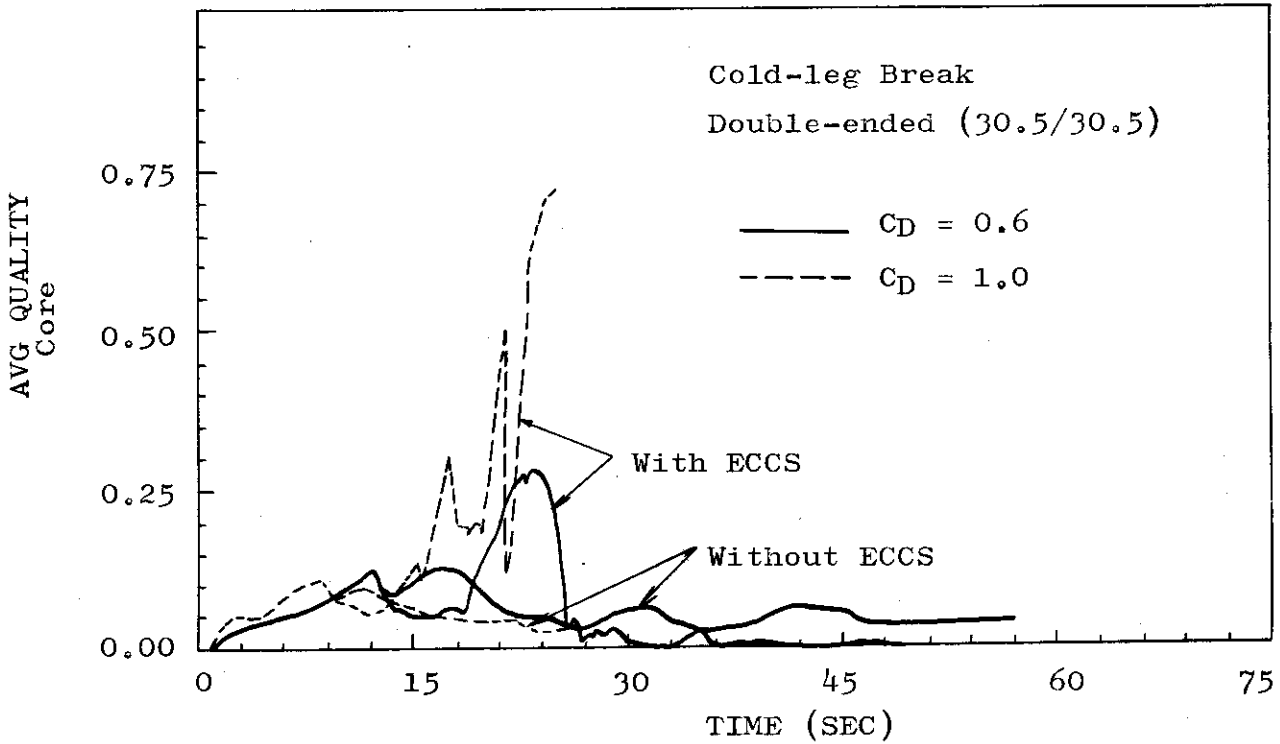


Fig. I.5 Average Quality in Core with and without ECC Injection.

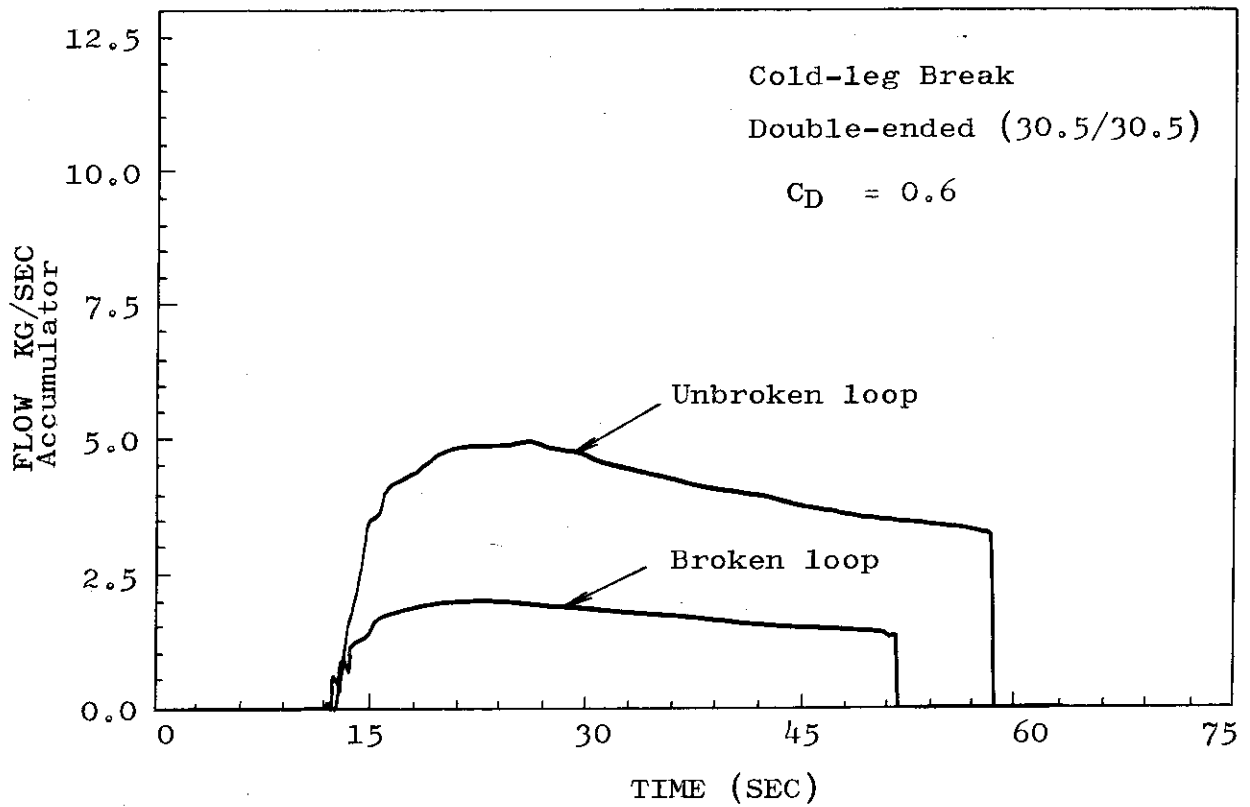


Fig. I.6 Flow from the Accumulators of Broken and Unbroken Loops.

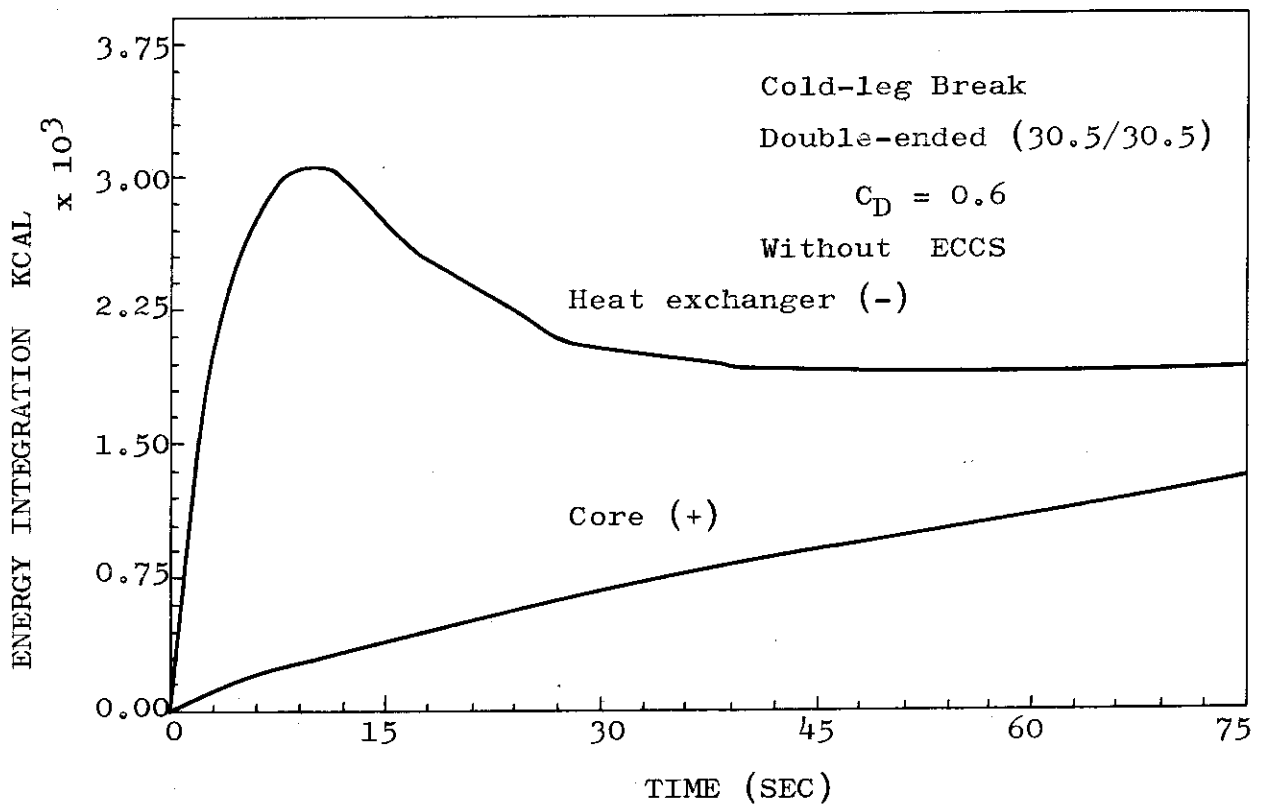


Fig. I.7 Heat Removed by Heat Exchangers and Generated in Core.

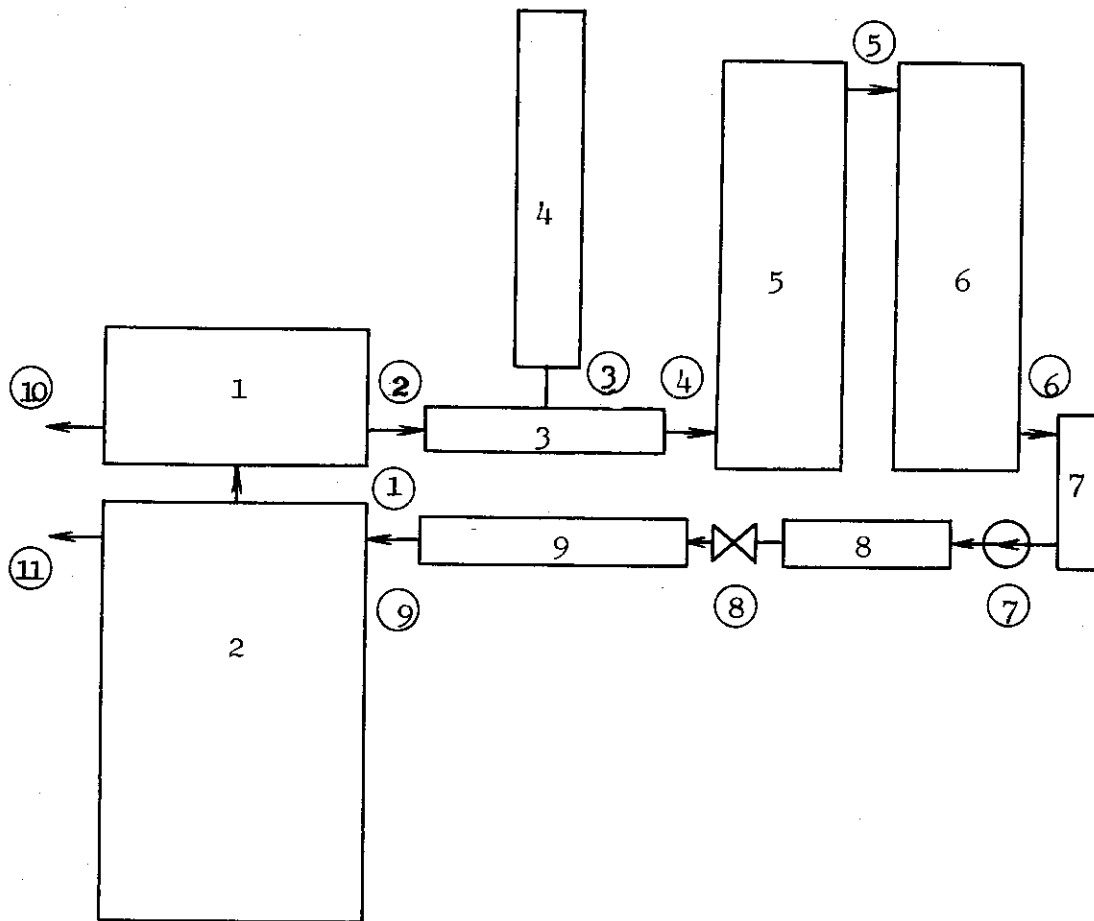


Fig. I.8 M9-11 Representation of 1-1/2 loop configuration

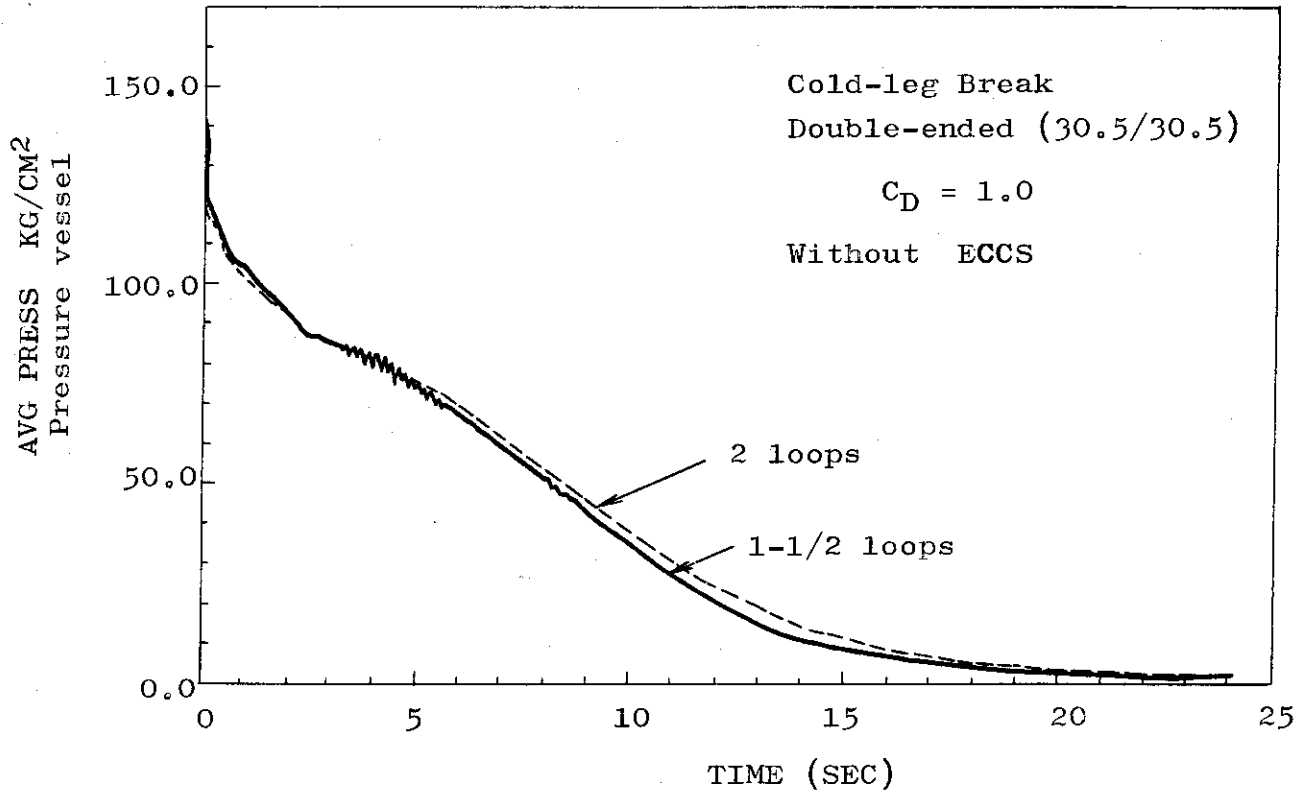


Fig. I.9 Average Pressure in Pressure Vessel with Different Volume Configurations.

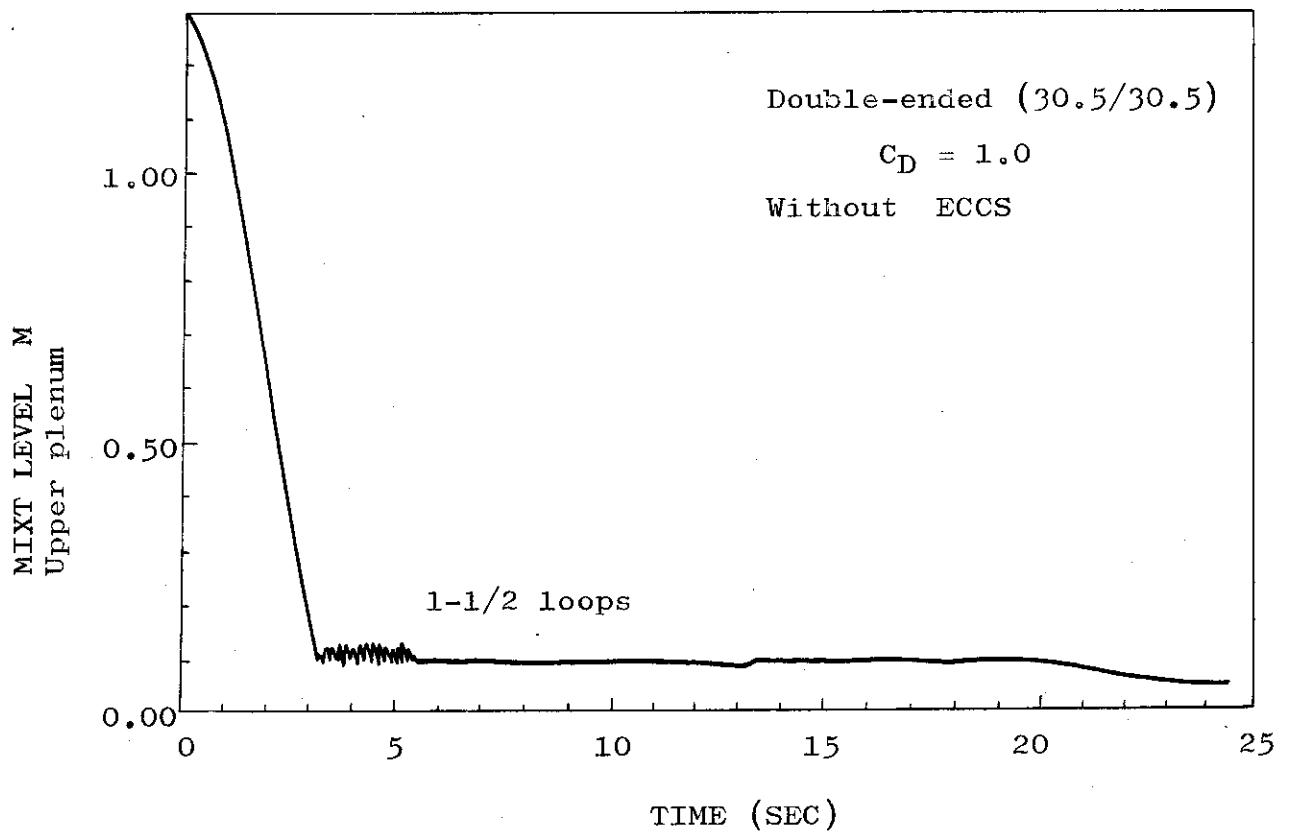


Fig. I.10 Mixture Level in Upper Plenum in 1-1/2 Loop Model.

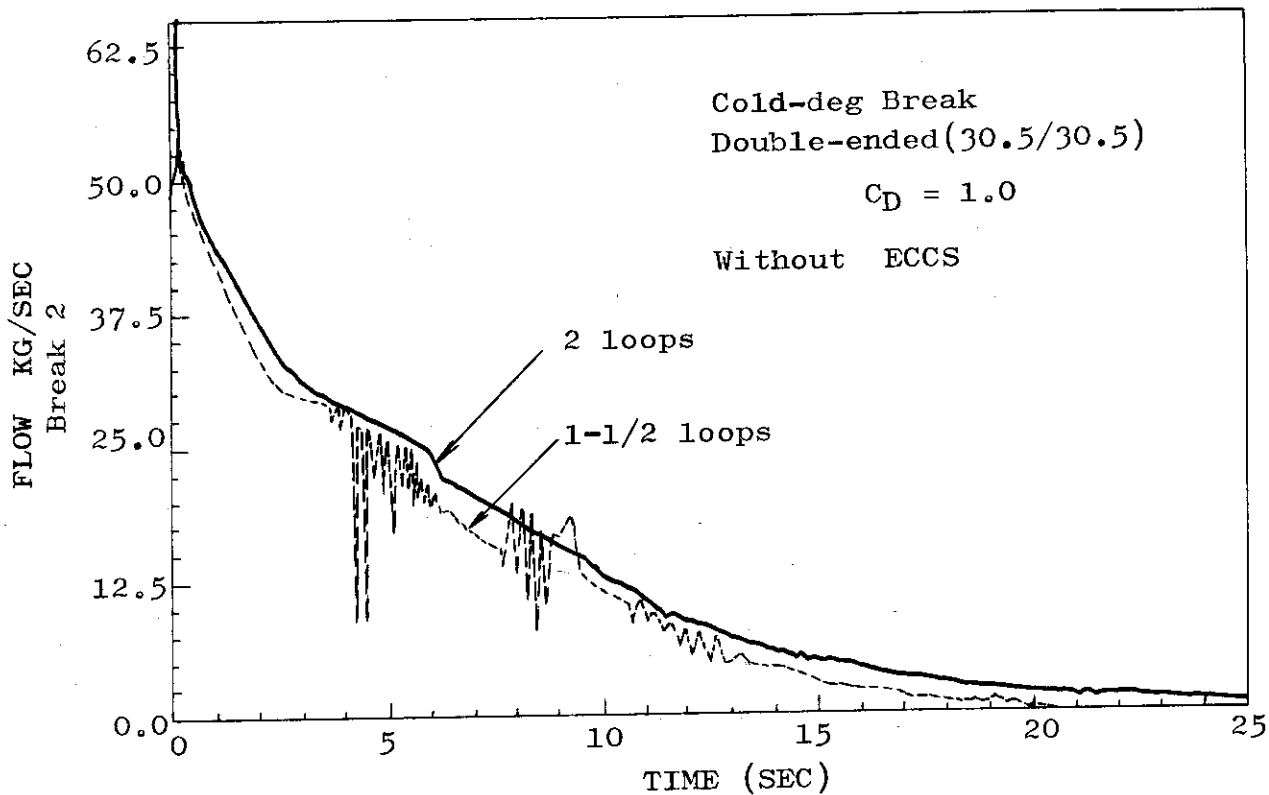


Fig. I.11 Flow from Break 2 with Different Volume Configurations.

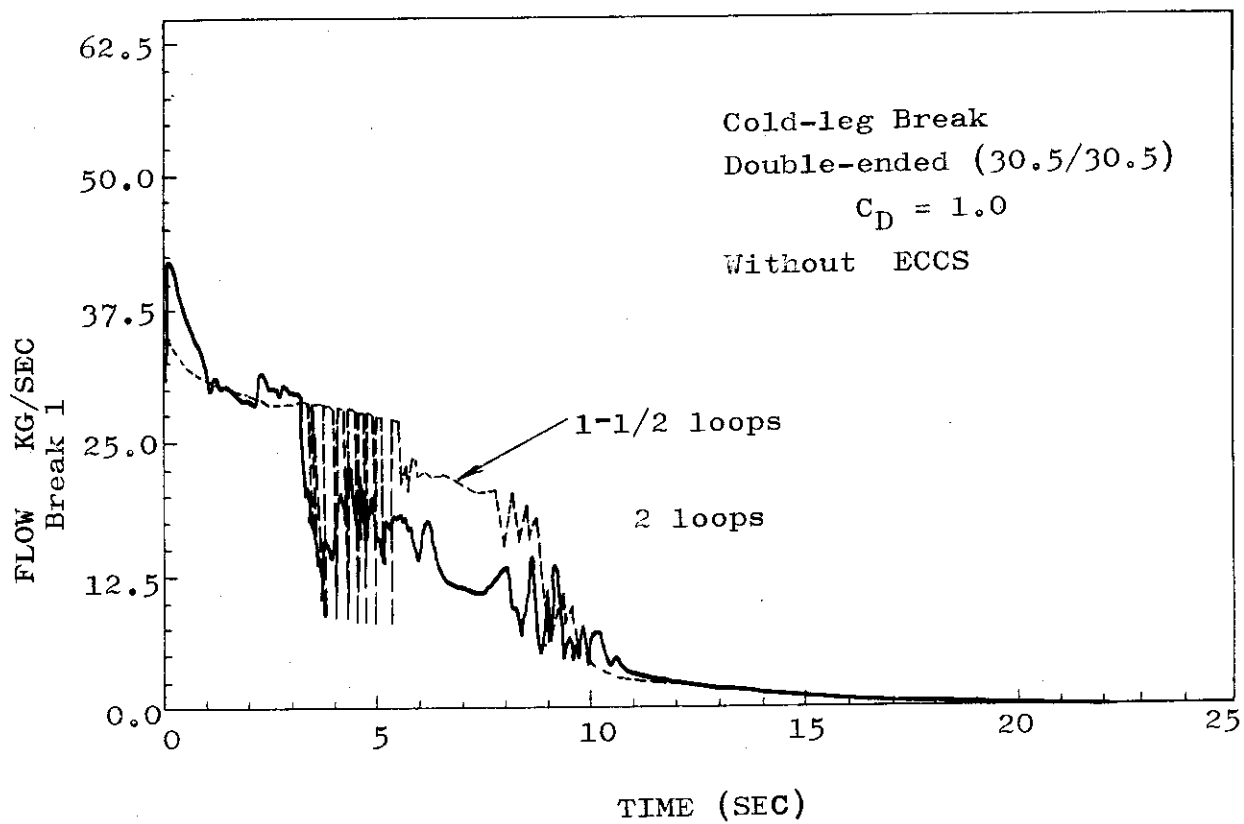


Fig. I.12 Flow from Break 1 with Different Volume Configurations.

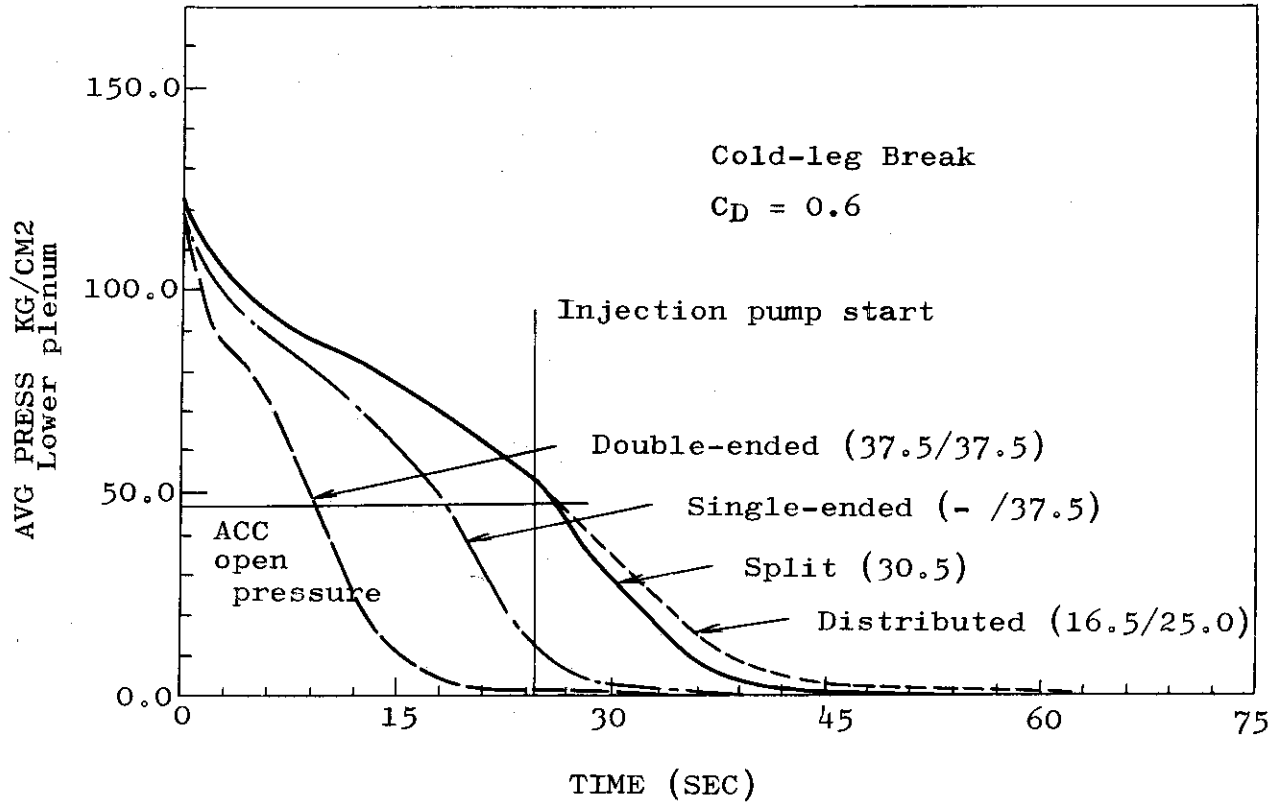


Fig.I.13 Pressure in lower plenum with various break types.

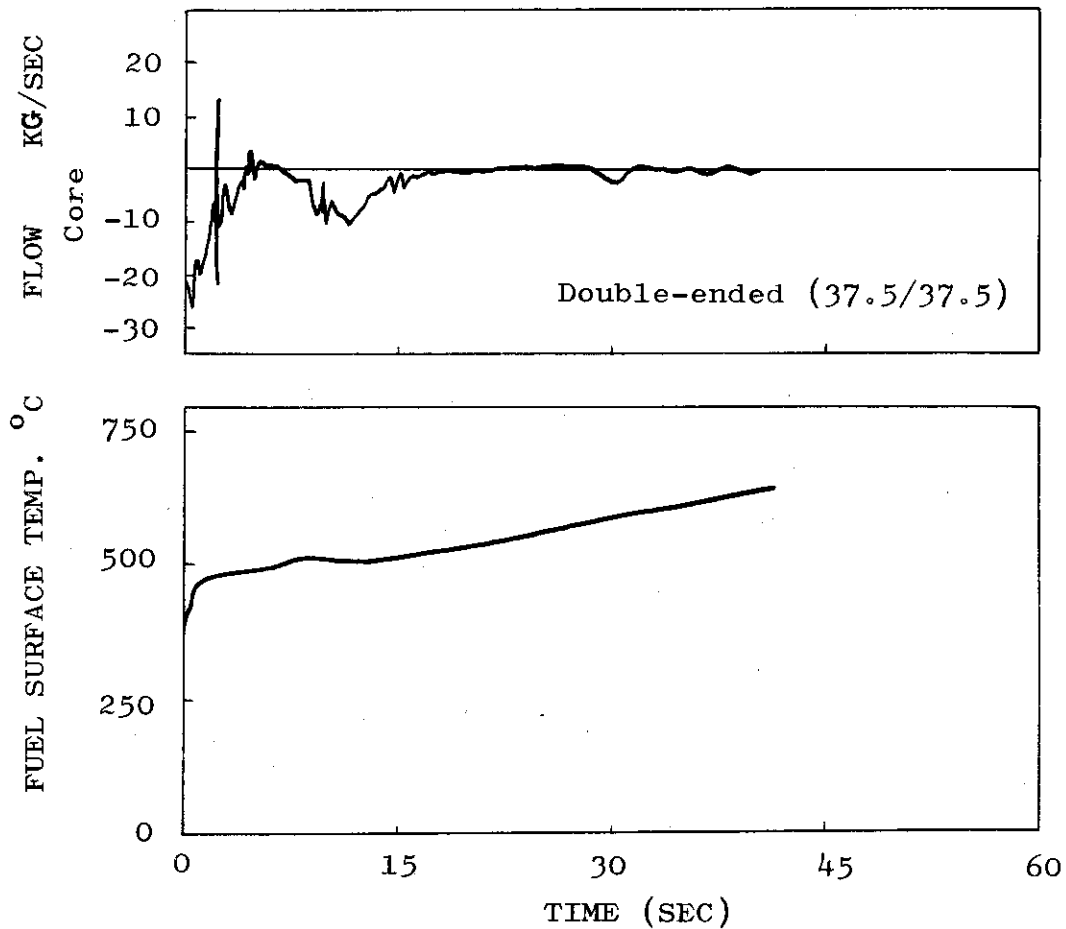


Fig. I.14 Fuel surface temperature and core inlet flow

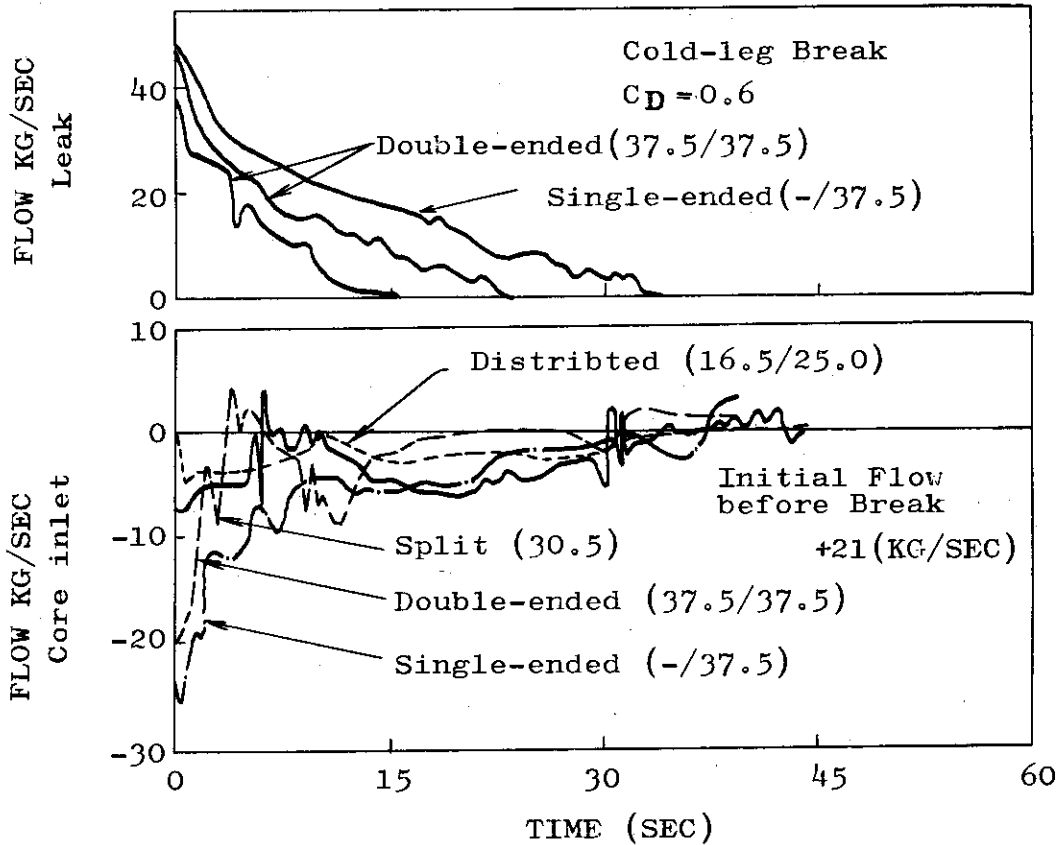


Fig. I.15 Core inlet flow and leak flow with various break types

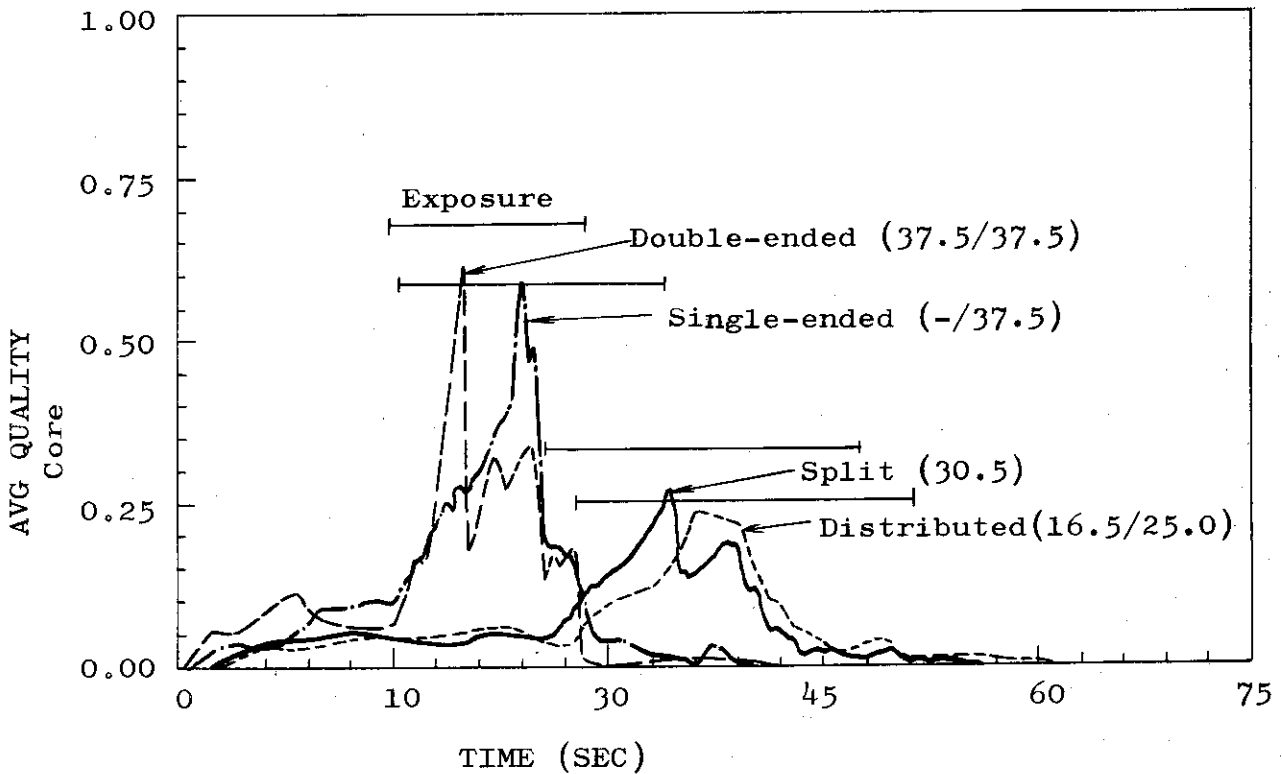


Fig. I.16 Steam quality in core volume with various break types

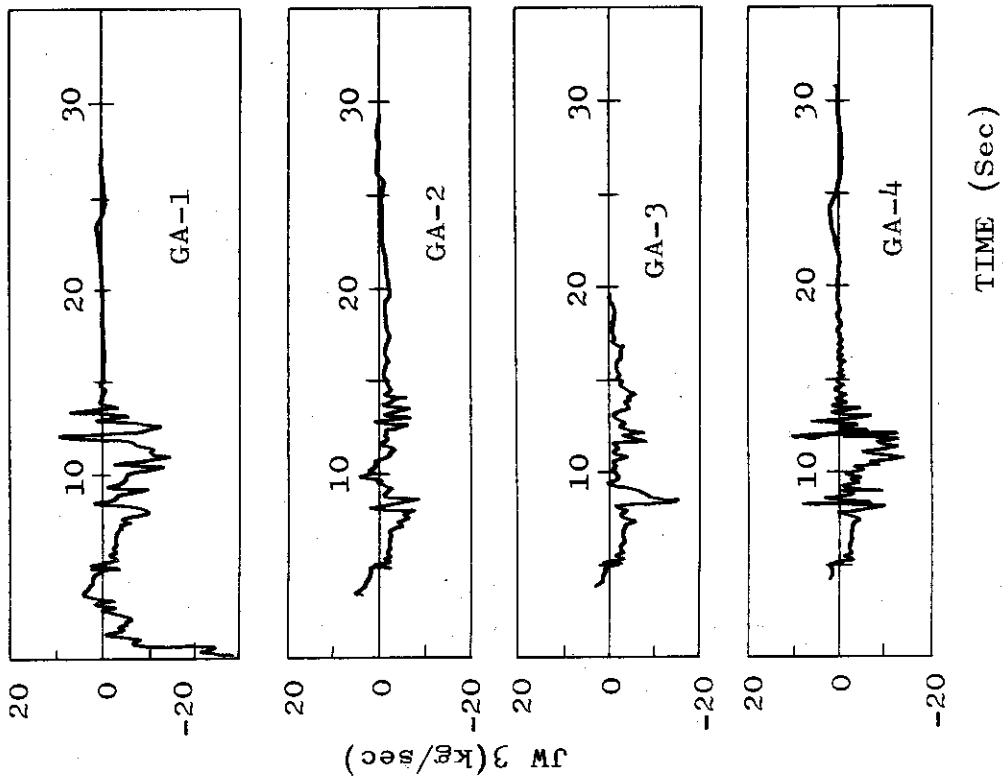


Fig.I.17 flow at core inlet with cold leg double-ended break.

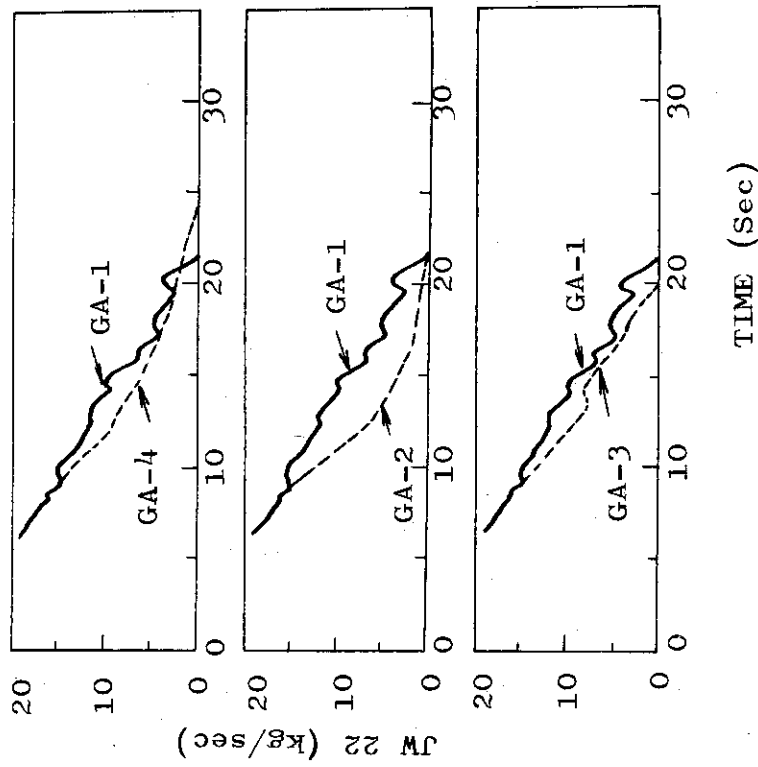


Fig.I.20 Comparison of flow from the break of PV-side with cold leg double-ended break.

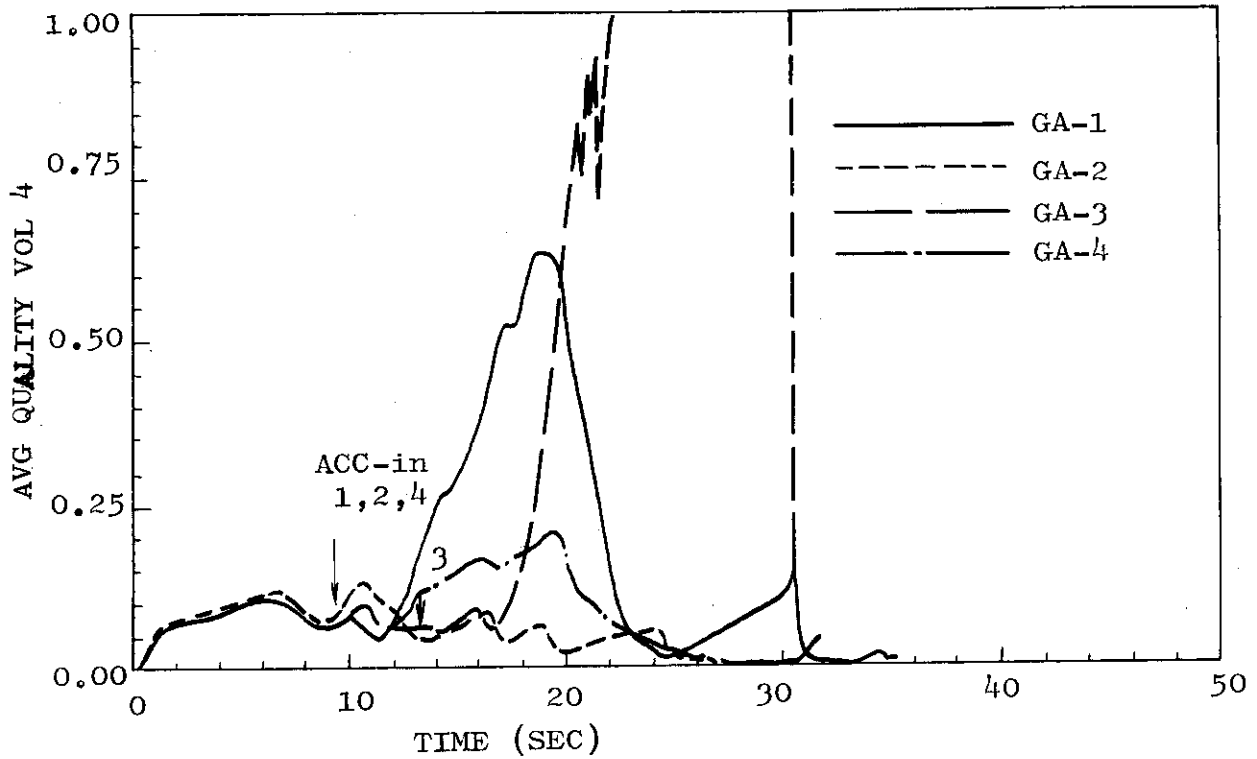


Fig. I.18 Average quality in core with cold leg double-ended break. (after the pump remodeling)

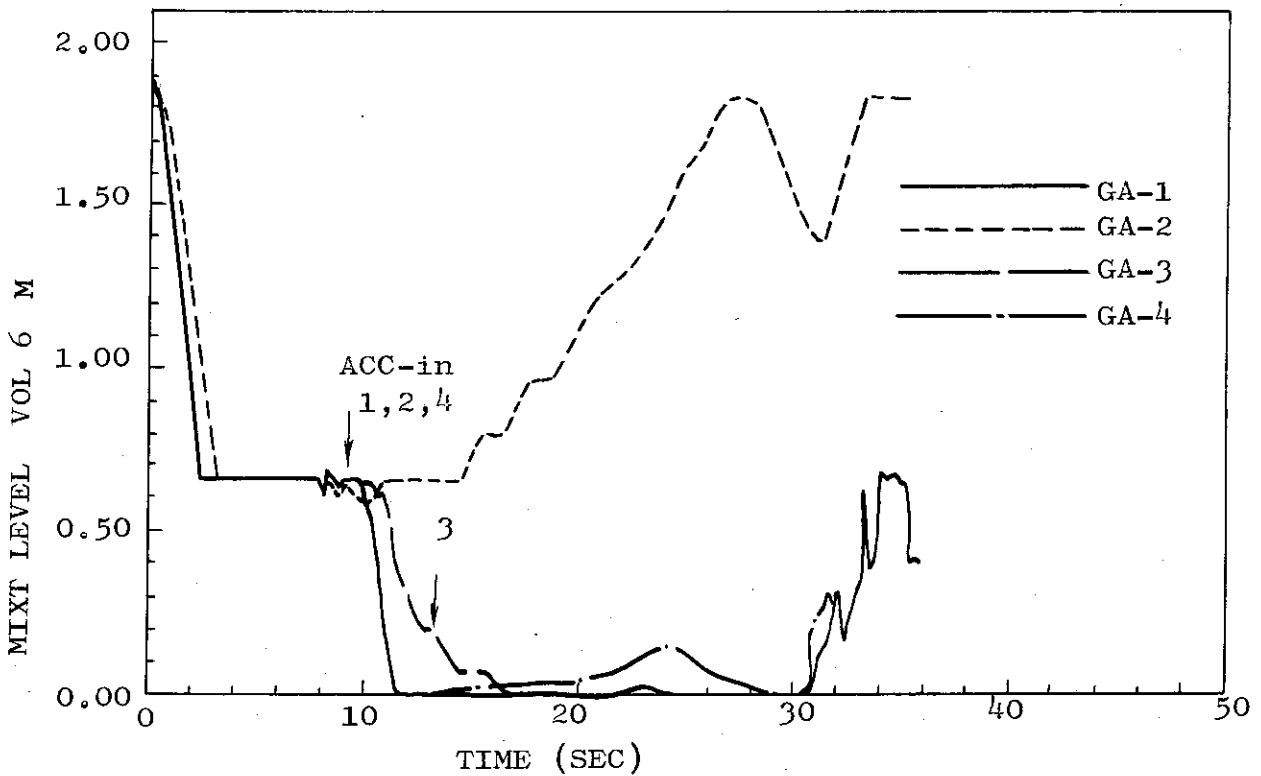


Fig. I.19 Mixture level in upper plenum with cold leg double-ended break. (after the pump remodeling)

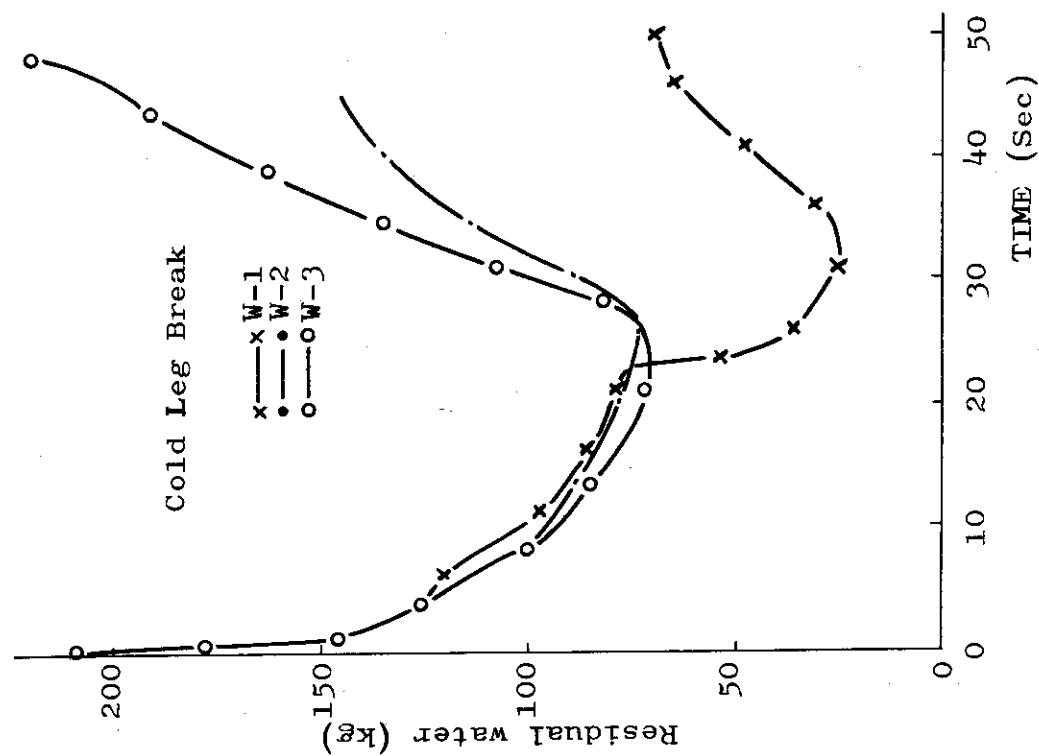


Fig.I.22 Residual water in the pressure vessel with cold leg break of the worst condition.

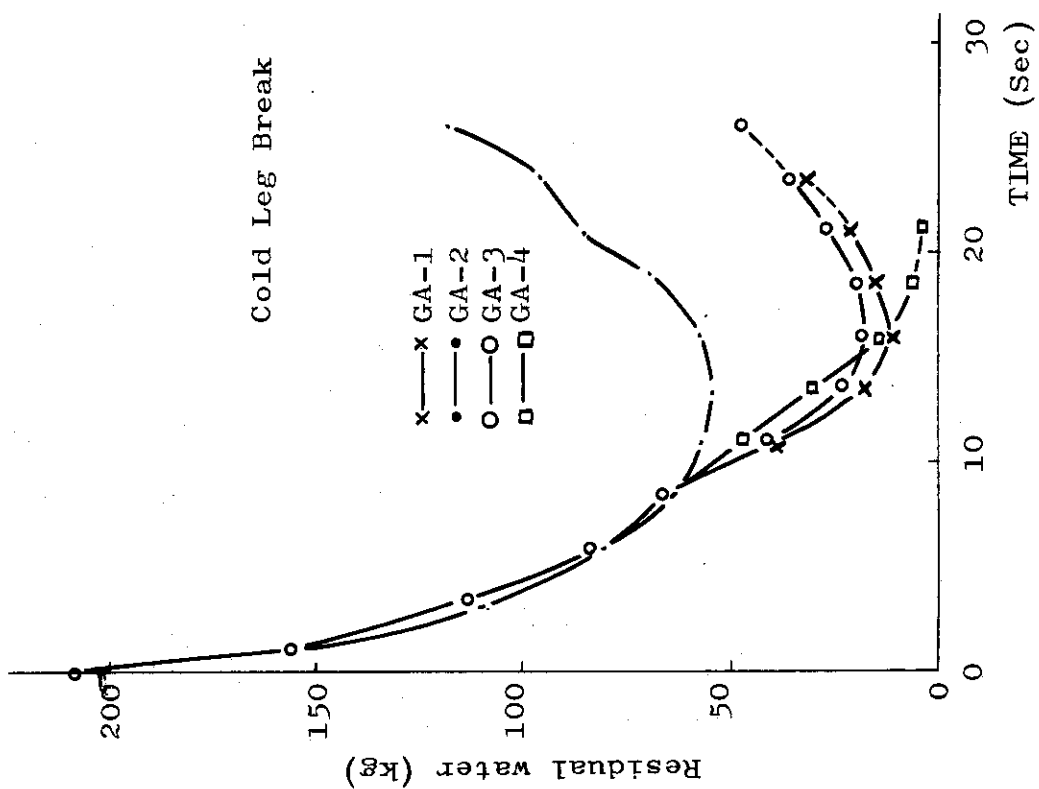


Fig.I.21 Residual water in the pressure vessel with cold leg double-ended break. (after the pump remodeling)

Table I. 1 Comparison of analytical results with various break conditions in cold leg.

	Break condition,* (diam. mm)	Duration of nearly zero flow in core (sec)	Maximum core quality (-)	Initiation ECC injection (sec)	Initiation exposure (sec)	Duration of exposure (sec)	Fuel surface temp. at 40 sec. (°C)
C-1	Double-ended (37.5/37.5)	4 ~ 8 17 ~	0.62	10	14	14	625
C-2	Single-ended (0/37.5)	23 ~	0.60	19	15	19	485
C-3	Split (37.5)	21 ~	0.84	18	18	14	575
C-4	Double-ended (30.5/30.5)	8 ~ 13 19 ~ 25	0.28	13	19	13	605
C-5	Single-ended (0/30.5)	30 ~	0.34	27(25) HP	21	27	450
C-6	Split (30.5)	7 ~ 13 32 ~	0.27	26(25) HP	25	26	560
C-7	Distributed (16.5/25.0)	0 ~ 6 8 ~	0.24	27(25) HP	27	24	570
C-8	Distributed (16.5/30.5)	5 ~ 8 25 ~	0.72	21	21	13	540

* Note: In the expression of diameter, the left value indicates the orifice diameter of the circulation pump side and the right does the one of pressure vessel side.

Table I. 2 ECCS Injection Condition for 4 Cold Leg Double-ended Breaks. (37.5 ϕ /37.5 ϕ)

	ACCL, 2		LPCI
	Location	Pressure	Location
GA-1	Cold Legs	46 at	Hot Legs
GA-2	Up. Plenum	46	"
GA-3	Cold Legs	20	"
GA-4	Cold Leg (Intact L.)	46	"

Table I. 3 ECCS Injection Condition for 3 Cold Leg worst-condition Breaks. (16.5 ϕ Pump-side/25.0 ϕ PV-side)

	ACC1, 2	LPCI
W-1	Cold Legs	Hot Legs
W-2	Up. Plenum	"
W-3	"	Low. Plenum

II 高温側配管破断の解析結果と考察

高温側配管破断の特徴は、破断箇所から上部プレナムに至る径路は短く、反対にダウンカマに至る径路は長い上、熱交換器や循環ポンプを通ることである。そのため上部プレナムに溜る蒸気は低温側破断の場合に比べて流出し易く、ダウンカマから破断口への水の流出は、その径路にある抵抗によって比較的少なくなると考えられ、より多くの水が残るので炉心の露出の危険性はやゝ低いものと考えられている。そこでこれらの特徴が低温側破断と比べて、各部の量にどのような違いを生ずるかに目を向けてみる必要があり、前と同様な観点における比較をいくつか行った。その結果で定性的に同じ現象を示したことは除いて、特に高温側配管破断の特徴的な現象を記すことにした。

II-1 ECCS 注入の有無による比較

ECC 水の注入条件と注入箇所を低温側破断の場合と同じにし、破断口径 3.75 mm の高温側両端破断を放出係数 0.6 で解析した (Fig. II, 2~5)。

流出流量の変化 蒸気発生器側から流出する量は、蓄圧系注入開始の時点から注入ありの方がやや多いが、その差が破断ループ側への注入量 2 kg/sec より多く流出しているとは認められない (Fig. II, 3)。すなわち低温側破断で認められた健全ループ側への注入水も流出してしまう炉心バイパス現象は生じているとは言えない。ただし注入後の両ループのダウンカマ口における流量は変動し、破断ループへ向かって増えている時刻もある。その理由として考えられるのは、注入箇所から破断にまでの径路にかなりの容積があるため、注入水は途中の流体と混合することである。それ故破断口での流出クオリティは注入によってわずかに低くなるだけで、低温側破断の場合ほど極端に低くなることはなく、流出量は余り増加しない。その点が両者の特徴の大きな違いとなっている。

一方上部プレナムからの流出流量の変化にも高温側破断の特徴が見られる。蓄圧系注入時点から注入ありの方が流出流量がかなり少くなり、低温側破断には生じなかった現象に示している。この理由は注入により低温側で生じた凝縮のために、上部プレナムの水位が流出ノズル以下に下がり、蒸気流出になったためである。破断口が上部プレナムから近いため、水位の変化による影響が流出流量に直接現れたもので、低温側破断で現れなかったのは破断口までの径路にやはり容積があるからである。これらの現象の違いは、実験において確かめる必要がある。

流出クオリティの変化 ダウンカマ側からの流出口における流出クオリティは、注入の有無によって大差が生じておらず、その理由は注入水の流出径路における混合によることは前述の流出流量と同様である (Fig. II, 5)。一方上部プレナムからの流出クオリティは、やはり前述の水位の一時的低下のため注入時点から急激に高くなっている。しかし再び減圧沸騰により水位が回復し、流出ノズルより高くなると、クオリティは下がっている。注入なしの流出クオリティの変化が、単調に増加するのとは極立った違いである。

炉心流量の変化 蓄圧系の注入により低温側の凝縮が生じて炉心流量が逆流になる点は、低温側破断と同様であるが、その度合は小さく、高圧・低圧系の注入開始以前に再び順流に戻っている点が異なる (Fig. II, 4)。順流に戻るのは、前述の水位の低下による蒸気流出が、上部プレナムにおける減圧速度を速めたためである。

炉心の平均クオリティの変化 炉心流量の方向に対応して、注入ありの方は注入時点からやゝ低

くなり、順流に戻る時から更に低くなっている (Fig. II, 4)。注入によって引き起こされる上部プレナムからの流れ込み流体が、時刻がまだ早いためにクォリティが低く、その逆流が持続しないので炉心クォリティが上がるに至らない。低温側破断の場合と異なる高温側破断の顕著な現象である。

II-2 配分破断の特徴の比較

前節で明らかになった ECC 注入の有無による現象の違いの中で高温側破断に特徴的なことは、すべて低温側破断との流出径路の違いに基づいている。それゆえダウンカム側からの流出径路にある抵抗・容積・熱源の影響の度合によっては挙動に別な特徴が現れる可能性もあると言える。こゝでもそれらの影響の度合を調べる方法として破断面積を配分させ、最大両端破断と比較することが必要である。そこで上部プレナム側からの破断口を最大にしたまゝ、ダウンカム側からの破断口の面積を三段階に零まで絞った結果を比較した。また特殊な破断ケースとしてダウンカム側からだけ流出する片側破断も同時に比較してみた。

最大両端破断においては炉心流量は破断後に逆流になるが、ダウンカム側からの径路の破断口面積をある値以下にすると、この逆流がなくなる (Fig. II, 6)。この点が高温側配分破断の特徴であり、逆流がなくなる破断口径は 25 mm 以下であることが分る。25 mm では頂度流量零がしばらく持続することが示され、炉心冷却の特に DNB 発生に対して問題となると考えられる。いずれの配分破断においても、蓄圧系注入時からは炉心流量が減少または逆流までに至り、やはり低温側における凝縮が原因している。またその後高圧・低圧系が注入開始すると、いずれも大きな順流が誘起され、振動が生じている。これも健全側配管に注入された水の凝縮作用に起因するものとみられ、一種の自励振動を現わしていると思われる。

炉心内の平均クォリティの変化 この変化は前記の炉心流量の変化と関連するが、破断後の逆流を生じない場合は、ゆっくり上昇するだけである (Fig. II, 7)。しかし蓄圧系注入によって炉心流量の減少または逆流が誘起されるとクォリティ上昇はやゝ速くなっている。ただしその立上りは低温側破断の場合に見られたほど急ではなく、逆流の流量の絶対値が小さいためである。高圧・低圧系が注入される時刻には、いずれの場合もクォリティは既に自然に減少する過程にあって、やゝそれが促進される程度にしか影響ない。この点も低温側破断との相違を示している。

一方蒸気発生器側だけから流出する片側破断でのクォリティは、比較的早くから急に上昇し、かなり他の場合より高くなる。これは上部プレナムに溜る蒸気の逃げ道がなく、まもなく炉心にも溜り始める蒸気滞留 (スチーム・バインディング) の現象を現わしている。この点も高温側破断の顕著な現象である。ただしこの様な片側破断は現実には起りにくいので、一つの極限的な現象とみなすべきであろう。実験で行うとすれば、コードの評価のためには意義深いと言える。

II-3 最悪破断条件の追究

種々の破断条件のうち炉心に対して最悪となる条件を、高温側破断についても低温側破断で行ったと同様な方法で決定することが必要である。しかし前にも述べたように高温側破断では比較的多くの水が残る傾向があり、小口径ではその傾向はより強くなるので、最悪条件という観点からは大口径が問題となる。そこで各破断条件について大口径の場合を比較した (Table. II, 1)

その結果破断後の炉心流量の低下という観点からは、H-1 の両端破断と H-6 の配分破断が破断

直後に低下しており、出カスクラム前のDNB発生の可能性を強く示唆するとともに悪条件となり得ることも示している (Fig. II, 8)。殊にH-6の面積配分比では、丁度炉心部が圧力の中点になり、破断後しばらく流れが止まる現象が見られる。

次に炉心の露出時間を比較する。高温側破断では明確な炉心の逆流や、それに伴う蒸気の流れ込みと炉心クォリティの急な立上がりが見れない場合がある (Fig. II, 9)。そこで仮想的に露出の開始の定義を次のようにする。逆流のある場合はその流れ込みの流量が多くないので、炉心上部が逆流になる時とし、順流ばかりの場合はその流量が零に近くなって炉心に自然に水面ができると仮定できる時とした。また露出の解消は順流が再び生じて積算流入量が炉心を満たす量になる時とした。これによると、露出時間の比較の上で、特殊な例の片側破断H-3を除く残りの例では、大きな差はない。ただし、その開始時刻は異なり、ECC注入時刻と関連している。H-3の片側破断で露出が早く、長いのは予想された蒸気滞留 (スチーム・バインディング) の現象がはっきり現れたものである。しかしこの例では前述の炉心流量が露出開始時刻まで逆流方向にかなりあり、現実にはDNB発生の可能性はほとんどない。

以上の判定から露出時間の長さだけでは両端破断と片側破断が長い、DNB発生の可能性と炉心露出による燃料温度上昇の最も大きくなると考えられるのはH-6の配分破断で、その口径 (25.0/37.5) の面積配分は4対のであるが、概略的には1対2と考えてさしつかえない。いずれの場合も両放出口の放出係数を0.6とした結果であるが、それぞれの放出係数が実験において異れば、これらの予備解析でみられた挙動とは多少異ってくることもあろう。その場合は別の面積配分でも実験を行い、最悪条件を見出す必要が生じる。

II-4 ECCS 最適注入条件の追究

高温側配管破断においても、ECCSの注入条件を標準条件から変え、その効果の違いを調べ、その中から上り炉心冷却に有効と考えられる注入条件を最適注入条件として決定した。その場合の破断条件には、やはり最大両端破断のほか、最悪条件破断を選んだ。解析した注入条件の例のうち主なものを Table II, 2~II, 3に示す。

解析結果のうち、まず炉心流量の時間変化を各注入条件の場合で比較すると、蓄圧系の注入開始後、標準条件においては逆流となるのに、他の例ではそれがほとんどない (Fig. II, 10)。蓄圧系注入なしのG-C-4に比べ、低温側注入のG-C-1では逆流、上部プレナム注入の影響の強いG-C-2および3では、順流の増加となって現れている。ブローダウン末期に低圧系が注入されるまでの炉心流量はG-C-1が不規則に持続し、3がかなりの量で持続している。これは下部プレナムにも注入している水が、上部の凝縮効果によって吸い上げられて炉心を流れているものと考えられ、炉心冷却に有効であるとみられる。

上記の結果として炉心内のクォリティを Fig. II, 11 でみると、G-C-3が注入後最も低くなる。注入なしの4が最も高くなっていることからみて、注入が逆効果になる例はいと言える。

上部プレナムの水位変化を Fig. II, 12 でみると、上部プレナムに注入するG-C-2と3で上昇している。2が3より速く上昇するのは、二つの蓄圧系を2では共に上部プレナムに注入しているからである。しかしそこに溜った水は、ほとんど炉心に落ちることなく破断口の方へ流出していることが前述の炉心流量から分かる。

流出流量の変化は蒸気発生器側より圧力容器側からの方に違いが大きく現れる (Fig. II, 13)。蓄圧系注入なしのG-C-4と比べて1は低温側に注入し、上部プレナムの水を引き込むため、流出流量は少くなる。上部プレナムに注入する2と3では、それが直接流出するため大幅に流出流量は増える。しかし3は2よりやや少ない。

圧力容器内の残存水量では、注入後いずれもやや遅れて上昇し、G-C-3が最も多い。1が一旦かなり少なくなってから上昇するのは、配管に注入するため、ループ内にのみ水が蓄積し、圧力容器から水を誘い出した後、ループから徐々に圧力容器内に落ちるためである。このような場合炉心はより多くの部分が一旦露出する可能性がある。3はその点でも最も炉心冷却の有効性が高いものと見られる。低圧注入系の注入条件の影響は、この後の再冠水過程に現れるが、最大両端破断の条件では十分見ることができない。そこでやや小口径に当る最悪破断条件について調べることになるが、高温側破断の最悪条件となる口径は余り小さくないので、短い時間についてのみ調べた。その結果再冠水速度が最も速くなる低圧系注入位置は下部プレナムであることが明きらかになった。

以上の比較から最も炉心冷却に有効となるECCSの注入位置は、蓄圧系を上部プレナムと下部プレナムに同時に注入し、低圧系を下部プレナムに注入する方法である。

Table II. 1 Comparison of analytical results with various break conditions in hot leg.

Case	Break condition * (diam. mm)	Duration of nearly zero flow in core (sec)	Maximum core quality (-)	Initiation of ECC injection (sec)	Initiation of exposure (sec)	Duration of exposure (sec)	Fuel surface temp. at 40 sec. (°C)
H-1	Double-ended (37.5/37.5)	2 ~ 3 16 ~ 21	0.14	10	11	16	615
H-2	Double-ended (30.5/30.5)	19.5 ~ 24	0.12	14	14	17	580
H-3	Single-ended (37.5/0)	26 ~ 31	0.35	19	7.5	> 26	515
H-4	Split (37.5)	19.5 ~ 23	0.15	18	19	12.5	480
H-5	Distributed (16.5/37.5)	19.5 ~ 24.5	0.13	16	16.5	12	500
H-6	Distributed (25.0/37.5)	0 ~ 5 13.5 ~ 21	0.18	13	13.5	13	590

* Note: In the expression of diameter, the left value indicates the orifice diameter of the steam generator side and the right does the one of pressure vessel side.

Table II. 2 ECCS Injection Location for 4 Hot Leg Double-ended Breaks. (37.5 ϕ /37.5 ϕ)

	ACC1	ACC2	LPCI
G-C-1	Cold Leg	Cold Leg	Hot Legs
G-C-2	Up. Plenum	Up. Plenum	"
G-C-3	Low. Plenum	Up. Plenum	"
G-C-4	—	—	"

Table II. 3 ECCS Injection Location for 4 Hot Leg Worst-Condition Breaks. (25.0 ϕ SG-side/37.5 ϕ PV-side)

	ACC1	ACC2	LPCI
D-C-1	Cold Leg	Cold Leg	Hot Legs
D-C-2	"	"	Cold Legs
D-C-3	"	"	Low. Plenum
D-C-4	Low. Plenum	Up. Plenum	"

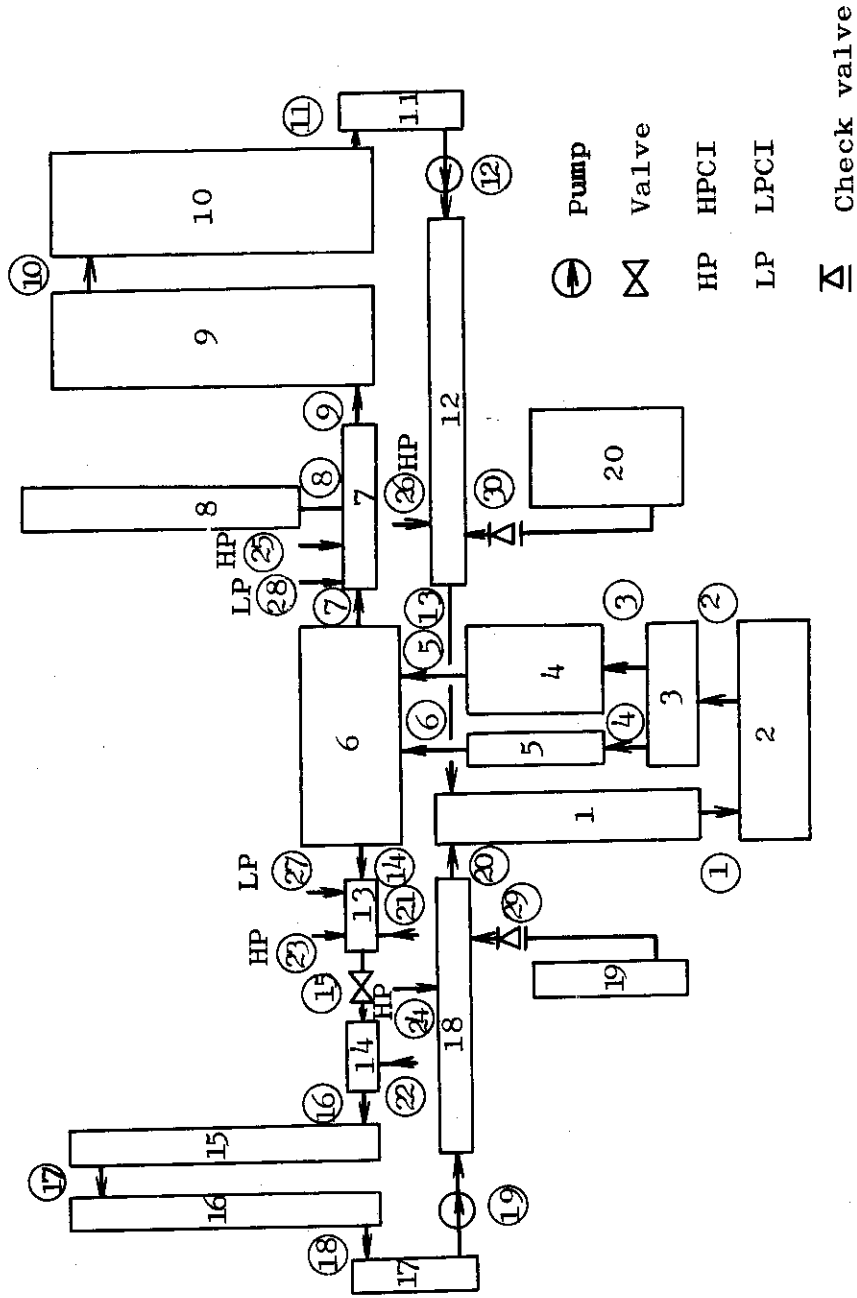


Fig.II.1 M20-30 Representation of hot leg break with ECCS

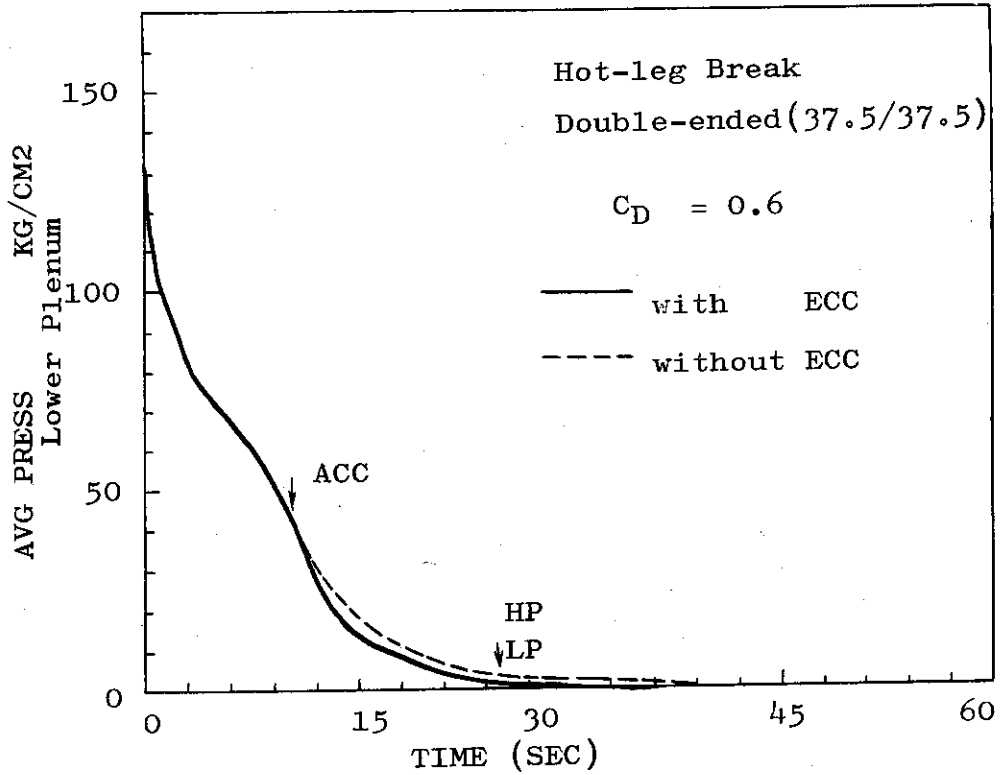


Fig. II 2 Average Pressures in Lower Plenum with and without ECC Injection.

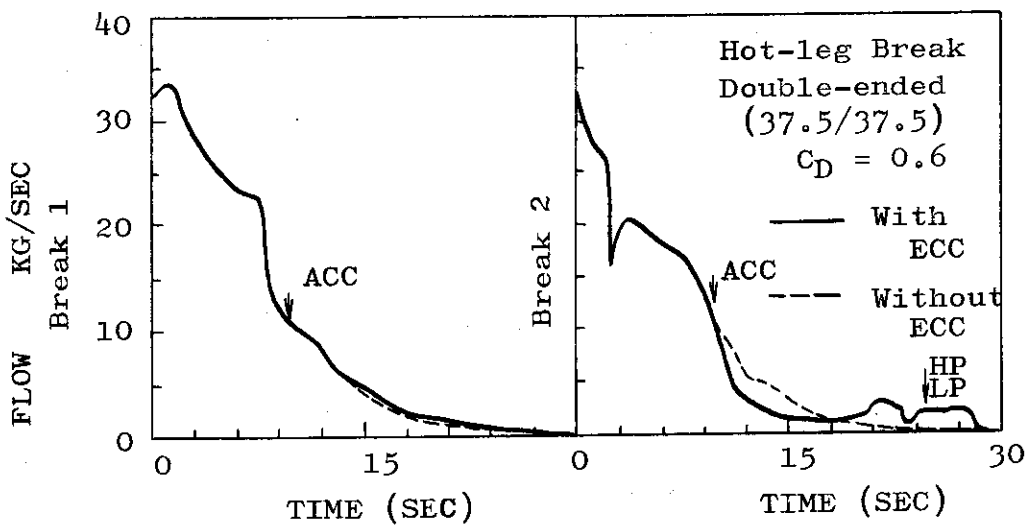


Fig. II.3 Flow from Breaks with and without ECC Injection.

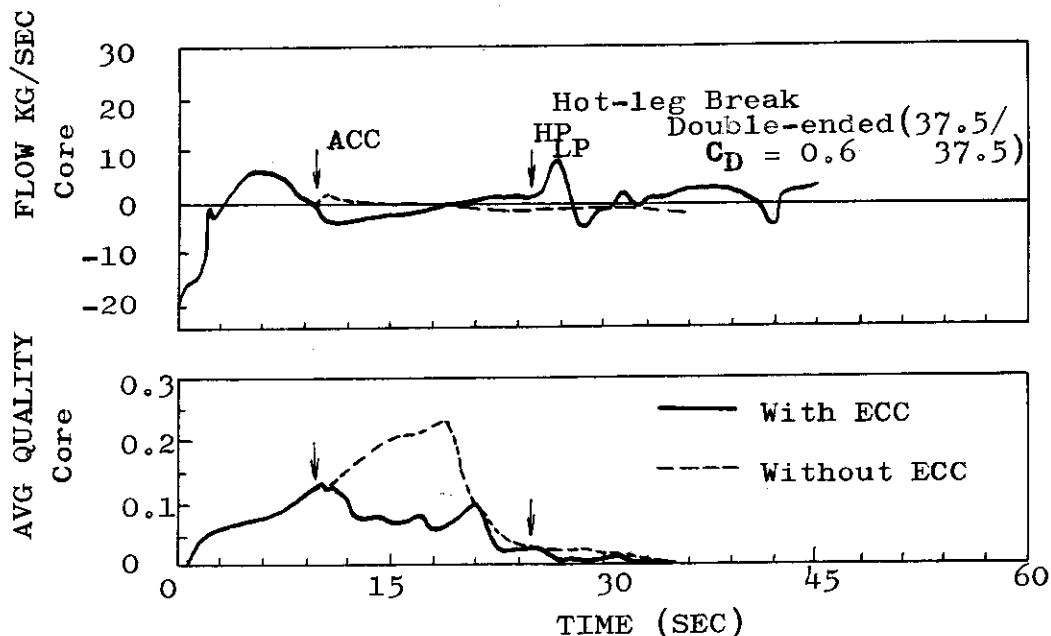


Fig.II.4 Flow at Core Inlet and Average Quality in the Core with and without ECC Injection.

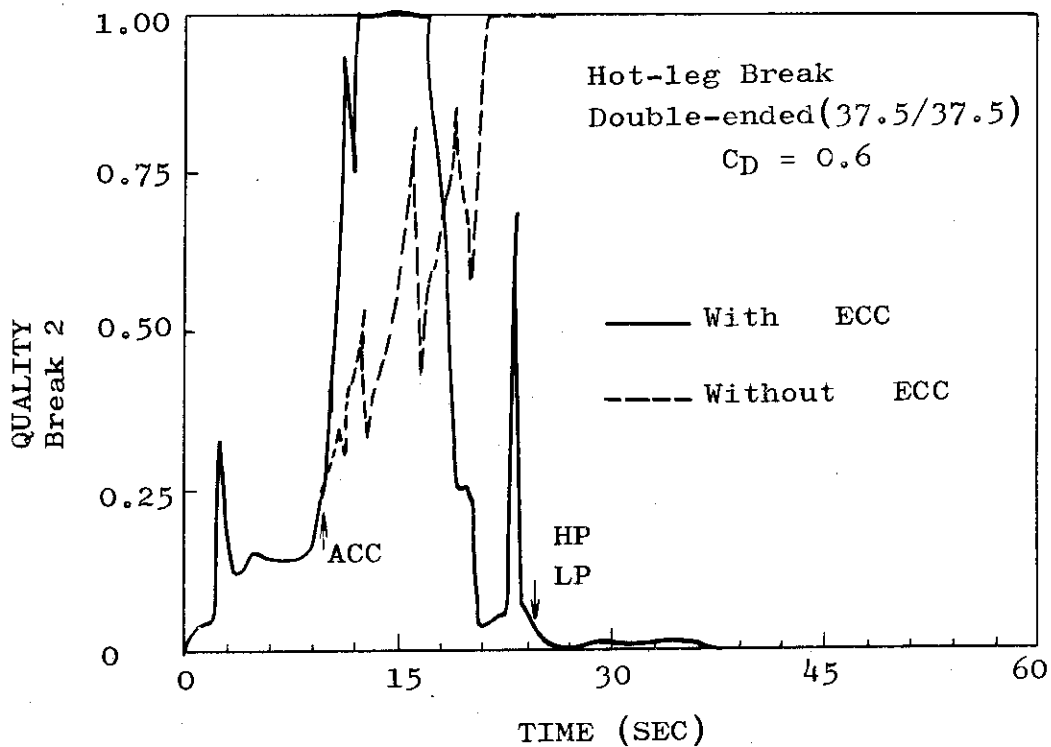


Fig.II.5 Leak Quality at the Break 2 with and without ECC Injection.

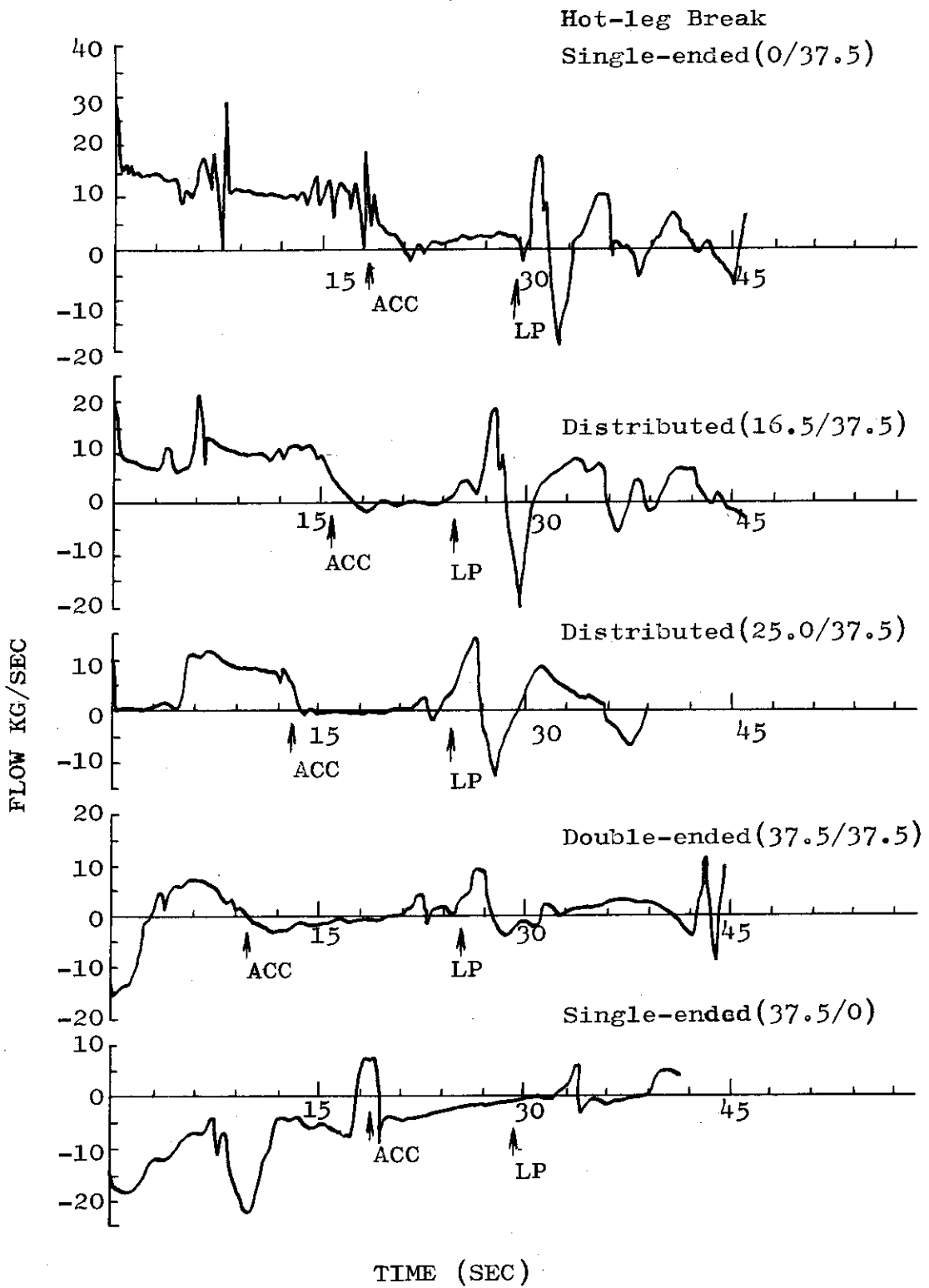


Fig. II.6 Flow at Core Inlet with Various Break Conditions.

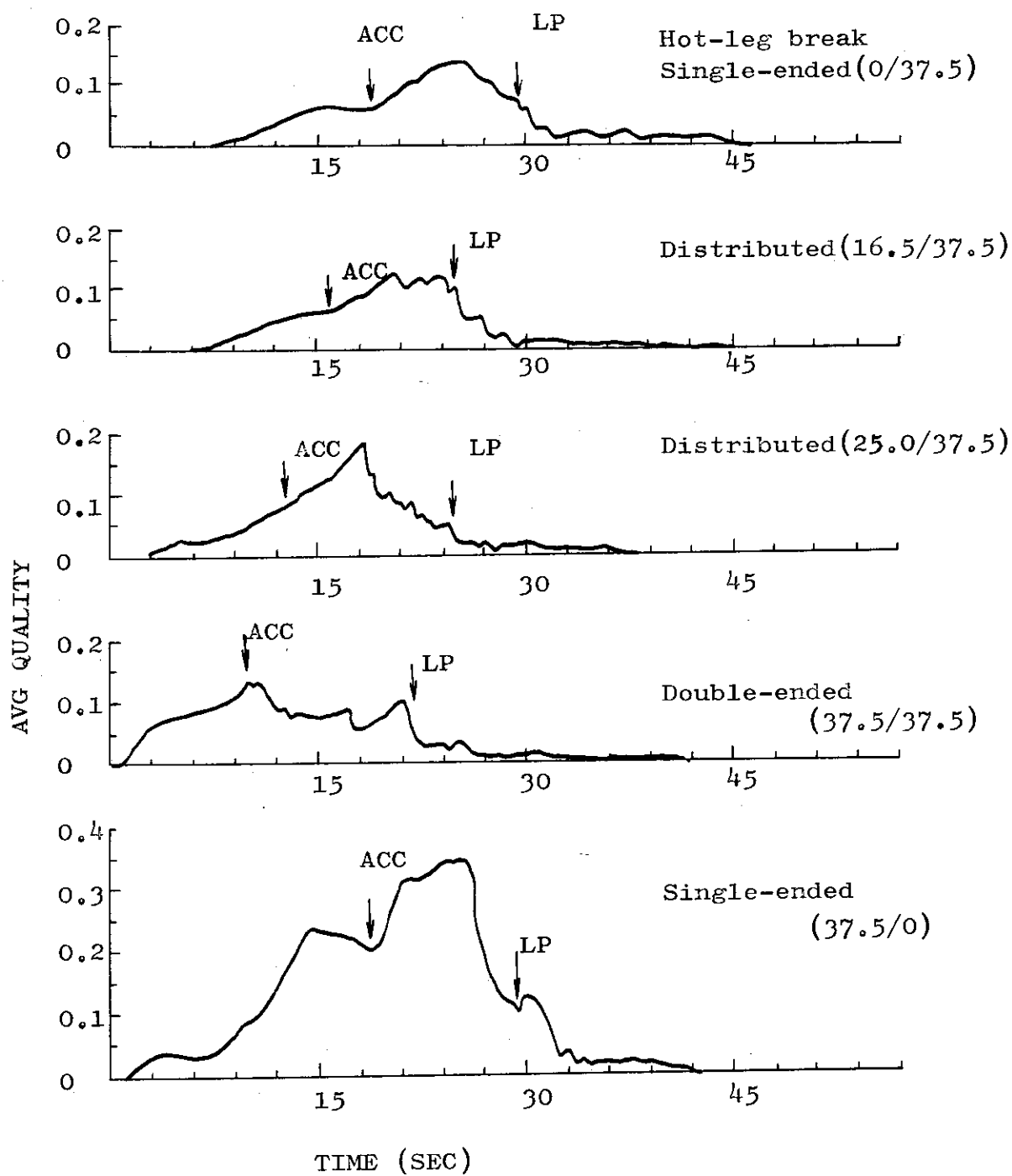


Fig. II.7 Average Core Quality with Various Break Conditions.

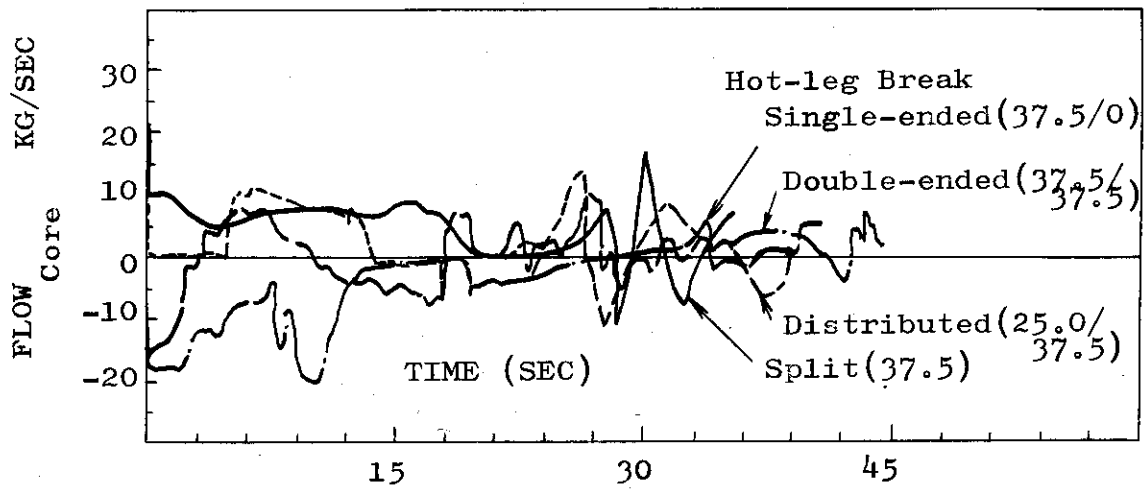


Fig. II.8 Flow at Core Inlet with Various Break Types.

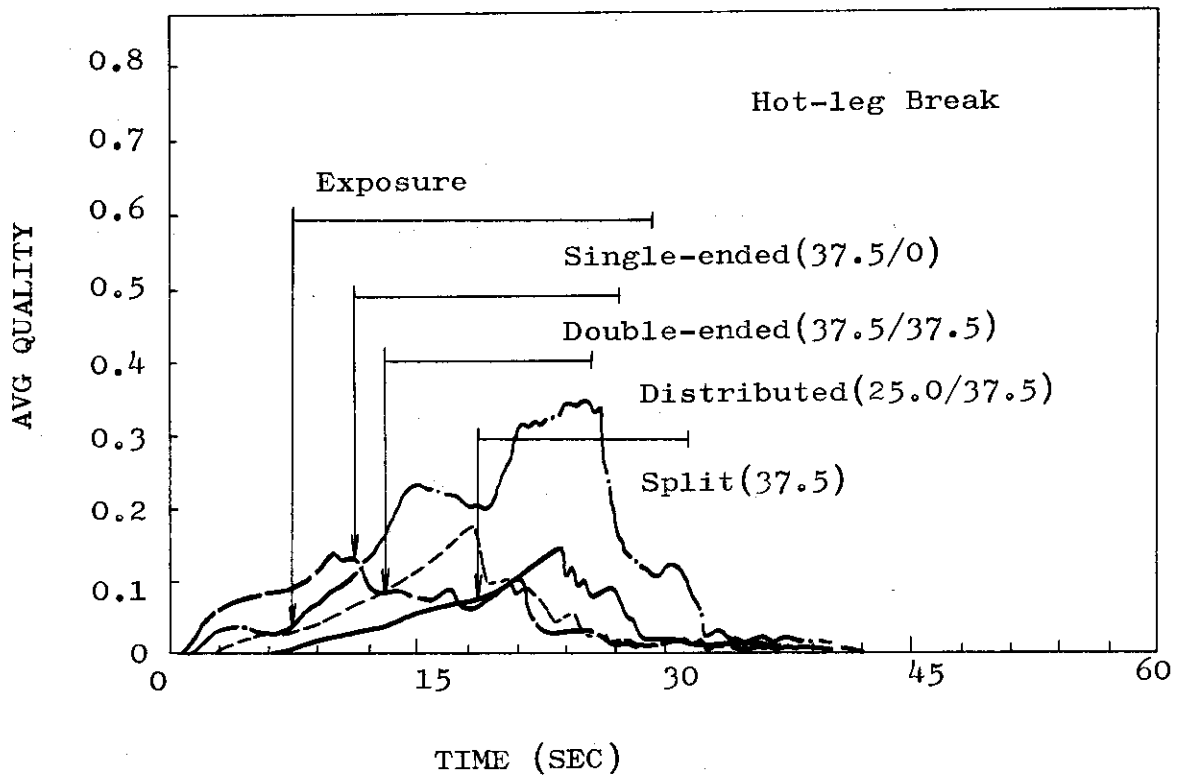


Fig. II.9 Average Core Quality with Various Break Types.

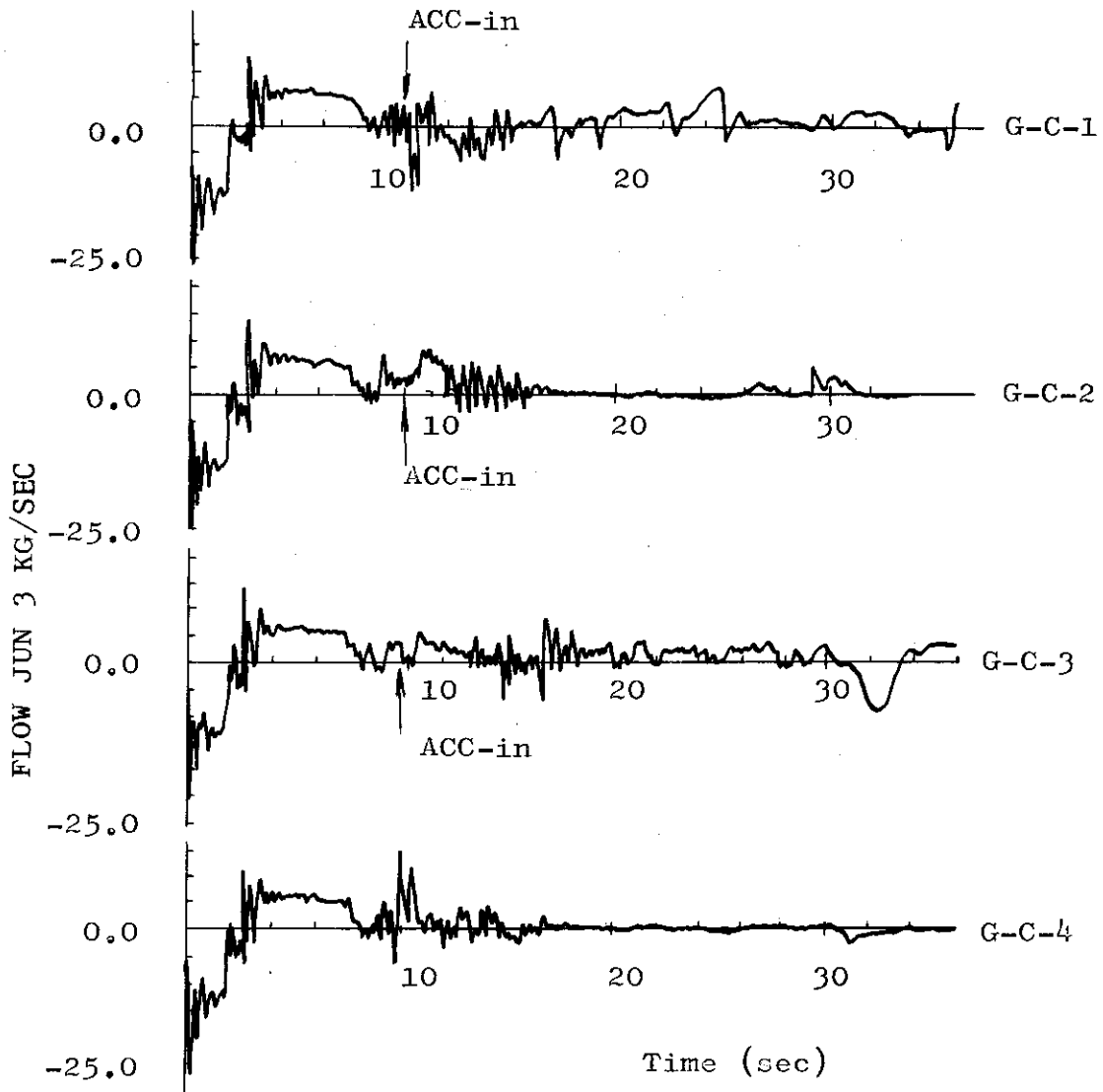


Fig. II.10 Flow at core-inlet with hot leg double-ended break.

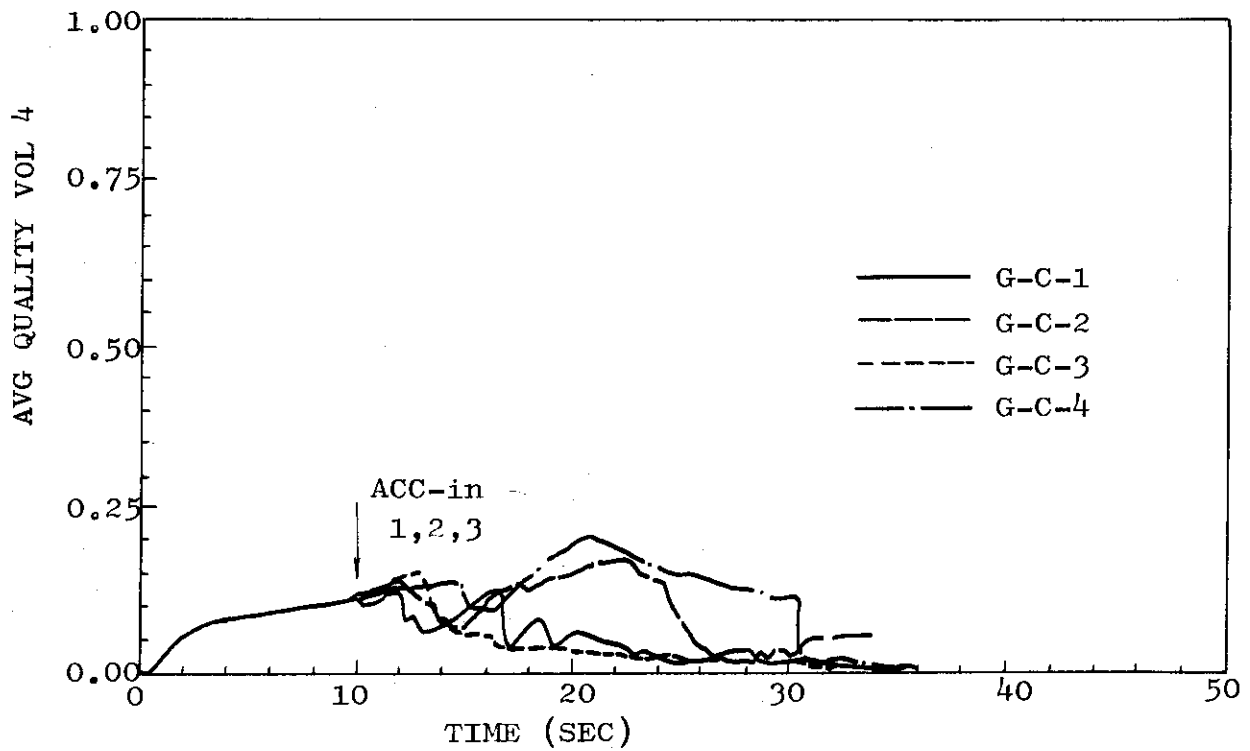


Fig. II.11 Average quality in core with hot leg double-ended break.

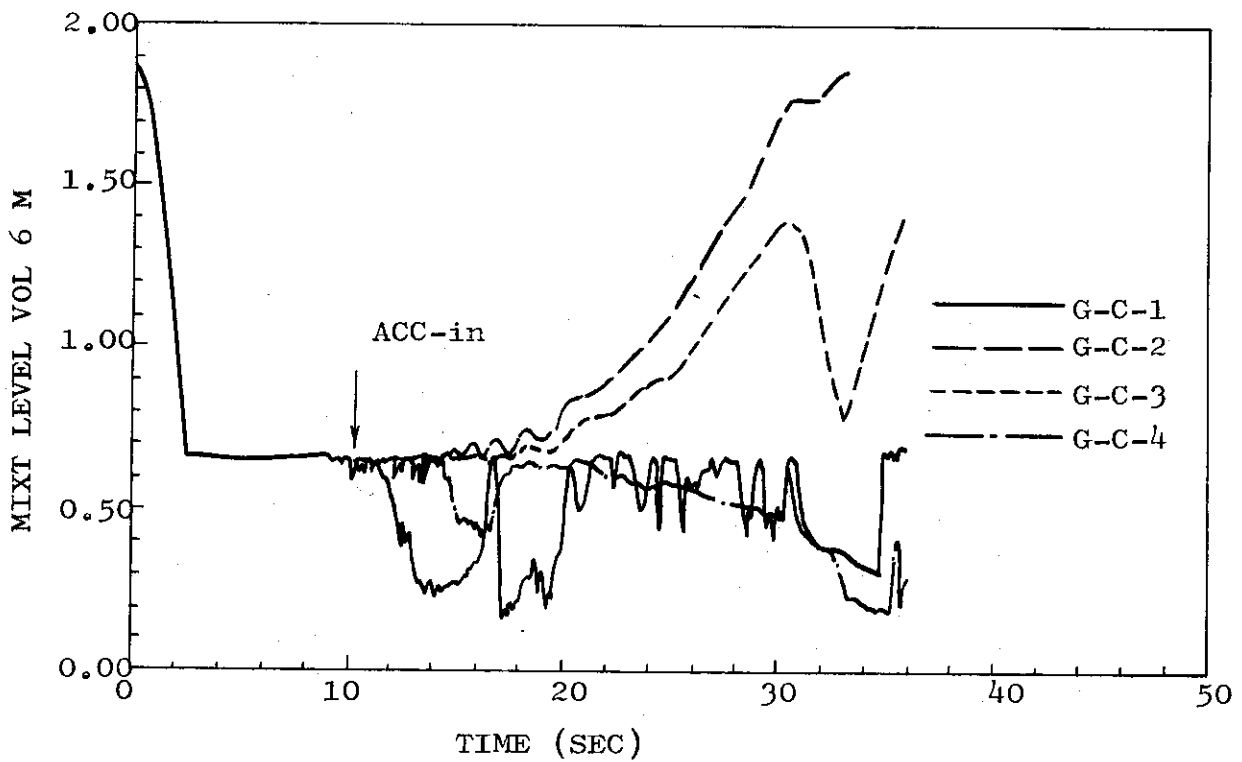


Fig. II.12 Mixture level in upper plenum with hot leg double-ended break.

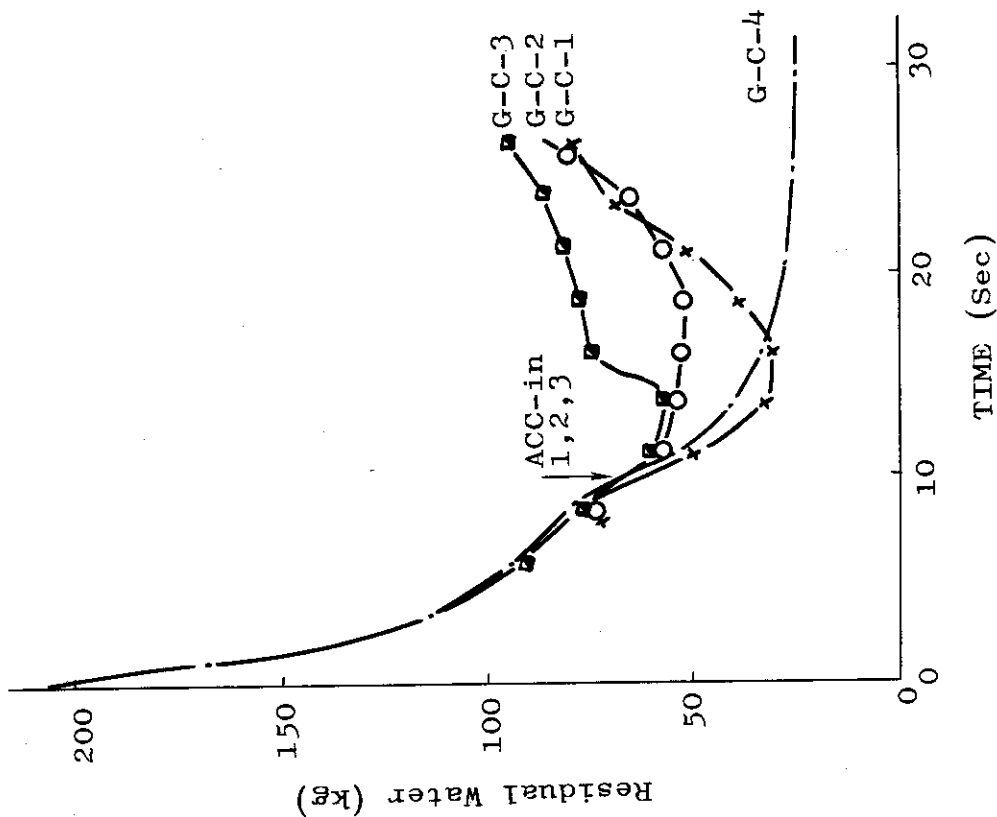


Fig.II.14 Residual water in pressure vessel with hot leg double-ended break.

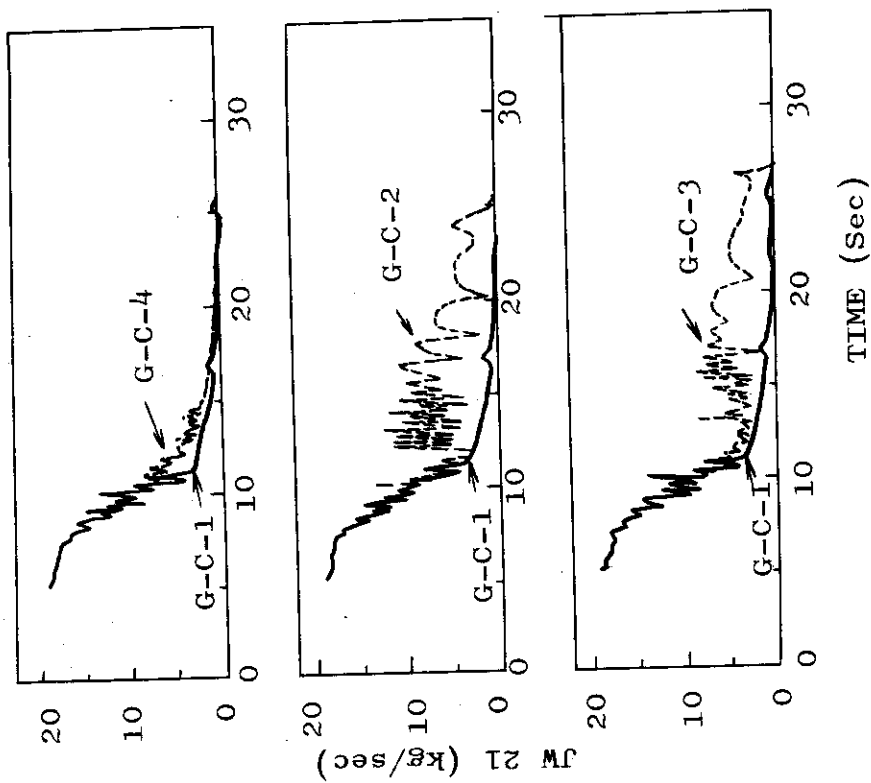


Fig.II.13 Comparison of low from the break of PV-side with hot leg double-ended break.