

JAERI - M
88-054

改良船用炉の試設計の評価(6)
——動特性——

1988年3月

楠 剛・横村 武宣

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

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 燃高野高速印刷

改良船用炉の試設計の評価(6)

—動特性—

日本原子力研究所原子力船研究開発室

楠 剛・横村 武宣

(1988年2月3日受理)

原子力船研究開発室では、昭和58年度から昭和60年度にわたり、半一体型炉、一体型炉、自己加圧一体型炉の3つの型の船用炉について試設計研究を実施した。

本報告書は、この3つの試設計炉について行なった比較、検討、評価のうち、動特性解析に基づく結果について述べている。動特性解析の結果、半一体型炉は実用上の完成度が高く、一体型炉は高性能プラントの可能性があり、自己加圧一体型炉はシステムを簡素化できることがわかった。

Evaluation of the trial design studies
for an advanced marine reactor (6)
- Kinetics -

Tsuyoshi KUSUNOKI and Takeyosi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Toranomom, Minato-ku, Tokyo

(Received February 3, 1988)

JAERI carried out the three reactors (Semi-integrated type, Integrated type, Self-pressurized Integrated type) as the trial designs of advanced marine reactor for three years (1983 ~ 1985).

This report presents the comparison and the evaluation of of the trial designs regarding kinetic analysis.

As the results, Semi-Integrated type is practical use and useful, Integrated type has possibility of high performance reactor plant, and Self-pressurozed Integrated type has simple system.

Keywords; Marine Reactor, Trial Design, Kinetic Analysis.

目 次

1. 緒言	1
2. 解析事象の選定	3
3. 動特性解析モデル	6
3.1 使用解析コード	6
3.2 核特性モデル	6
3.3 熱水力モデル	7
3.4 制御系モデル	8
3.5 安全保護系モデル	10
4. 解析結果の比較	30
4.1 急速出力上昇	30
4.2 急速出力減少	31
4.3 後前進切換	33
4.4 出力上昇	34
4.5 出力減少	35
4.6 急速前後進切換	35
5. 試設計動特性比較評価	66
6. 結論	67
参考文献	67

目 次

1. 緒言	1
2. 解析事象の選定	3
3. 動特性解析モデル	6
3.1 使用解析コード	6
3.2 核特性モデル	6
3.3 熱水力モデル	7
3.4 制御系モデル	8
3.5 安全保護系モデル	10
4. 解析結果の比較	30
4.1 急速出力上昇	30
4.2 急速出力減少	31
4.3 後前進切換	33
4.4 出力上昇	34
4.5 出力減少	35
4.6 急速前後進切換	35
5. 試設計動特性比較評価	66
6. 結論	67
参考文献	67

Contents

1. Introduction	1
2. Selections of The Load Maneuvering Conditions	3
3. Models of Analysis	6
3.1 Computer Code Used	6
3.2 Neutron Kinetics Models	6
3.3 Thermohydraulic models	7
3.4 Control system models	8
3.5 Safety Protection models	10
4. Comparison of the Results of Analysis	30
4.1 Rapid Load Increase Maneuvering	30
4.2 Rapid Load decrease Maneuvering	31
4.3 Astern to Ahead Maneuvering	33
4.4 Load Increase Maneuvering	34
4.5 Load Decrease Maneuvering	35
4.6 Crash Stop Astern Maneuvering	35
5. Evaluation of the Trial Design Regarding Kinetics	66
6. Conclusion	67
References	67

1. 緒 言

原子力船研究開発室では、昭和58年度から60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは、小型・軽量で安全性、信頼性、経済性に優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉、及び自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれ、わが国固有な技術およびフランス、西ドイツの提携技術を基盤技術としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるにあたり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、併せて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉の比較検討
- (2) 燃料特性
 - (I) 丸棒燃料
 - (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能
 - (I) 遮蔽設計の妥当性
 - (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

更に、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに、次のステップで実施する設計研究等の目標性能、開発性能の進め方等を明らかにする。

本報告書は、これら一連の設計評価研究のうち、動特性観点から比較評価を行なったものである。ここでは、試設計3炉型に対し同じ負荷変動を与えた場合の応答の比較を試みる。

* 1 原子力船研究開発室、「改良船用炉試設計報告書（自己加圧一体型炉）」、
JAERI-memo-61-326, 1986年11月
原子力船研究開発室、「改良船用炉試設計報告書（半一体型炉）」、JAERI-memo-61-327,
1986年11月
原子力船研究開発室、「改良船用炉試設計報告書（一体型炉）」、JAERI-memo-61-328,
1986年11月

いずれも未公開資料

対象とする負荷変動は次の6ケースである。

- ① 急速出力上昇
- ② 急速出力減少
- ③ 後前進切換
- ④ 出力上昇
- ⑤ 出力減少
- ⑥ 急速前後進切換

比較を行なう項目は、原子炉出力等の動特性評価に必要な代表的なパラメータに限る。各試設計炉の詳細な解析結果については、別途作成の報告書^{*1}に記されている。各炉型の動特性計算は各々異なった解析コードで行なわれ、解析モデルの詳細さに若干の差があるが、使用された解析コードは過去に使用実績のあるコードである。各試設計炉に対する解析結果は全て妥当なものとして比較を行なった。

以下、第2章では解析事象として選んだ負荷変動条件について述べた。第3章では使用した解析モデルについて3炉型の比較を行ないながら説明した。第4章では動特性解析の結果を示した。第5章ではこれらの解析結果に基づき動特性の観点から3炉型の比較・評価を行なった。

2. 解析事象の選定

船舶において想定される負荷変動に対する動特性の点から試設計炉を比較して評価を行なうために次の6ケース（F i g 2.1 参照）の負荷変動時の解析を行なった。

- ① 急速出力上昇（基底負荷→常用負荷）
- ② 急速出力減少（前進全負荷→基底負荷）
- ③ 後前進切換（後進全負荷→基底負荷→前進全負荷）
- ④ 出力上昇（基底負荷→前進40%負荷→前進全負荷）
- ⑤ 出力減少（前進全負荷→基底負荷）
- ⑥ 急速前後進切換（前進全負荷→後進全負荷）

各負荷における原子炉出力および蒸気流量をTable 2.1に示した。静定時の蒸気流量割合は原子炉出力レベルと一致させた。蒸気発生器を出た蒸気の流量は、一つの代表された蒸気流量制御弁で調整される。定格出力（100%）時、全蒸気流量の90%は主機タービンで使用され、10%が発電機他の補機類で使用される。補機類で使用する蒸気10%は、主機タービンの出力に係わらず消費され、F i g 2.1の基底負荷に相当する。

負荷変動は代表された蒸気流量制御弁の開度変化として与えた。蒸気流量制御弁は負荷での静定時の弁開度まで直線的に変化し、主機操縦弁の回転数等によるフィードバックは考慮しない。また、解析モデルとしては前進側主機操縦弁、後進側主機操縦弁という設定は行なわなかった。

次に各負荷変動に対応する船側の事象および設定理由について記す。①～③は設計条件として与えた負荷変動であり、④～⑥は実際の船の運行を想定した条件である。設計条件の設定は、基本的には原子力第1船「むつ」で用いた設計条件の考え方を踏襲した。

①急速出力上昇

急速出力上昇は、設計条件として与えた負荷変動条件であり、3%/sで蒸気需要が増加した場合である。通常の操作としては行なわれないが、在来タービン船においては主機タービンが暖まっていれば可能な操作である。

②急速出力減少

設計条件の一つで負荷が100%から10%まで1秒で変化した場合である。事象としては主機タービンのトリップに相当する。船用炉においては主機タービンがトリップした場合でも原子炉がスクラムすることなく安全に次の定常状態に推移しなければならない。

③後前進切換

原子力船の設計条件として設定された特殊な負荷変動条件である。後進全負荷から5秒で基底負荷まで変化し50秒保持した後30秒で前進全負荷まで変化させる。

④出力上昇

通常行なわれる操船を模擬した負荷変動条件で、港内全速前進時の出力を40%と設定した。出港時の出力上昇速度は主に主機タービンの熱応力により制限されている。この負荷変動条件は実際に行なうであろう操作時に不都合な挙動を生じないことの確認である。

⑤出力減少

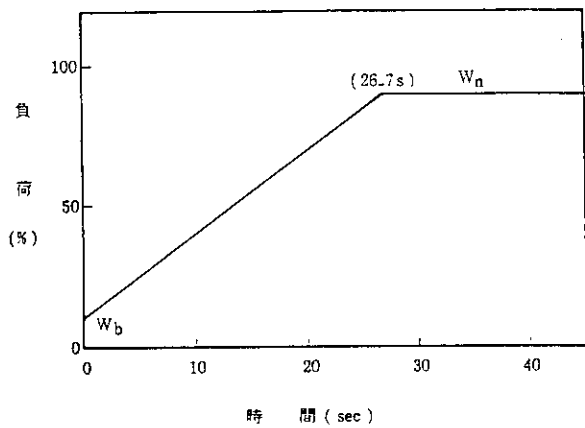
後前進切換での負荷の減少は5秒と仮想的な条件を用いている。出力減少は主機操縦弁が急速に閉じた場合、実際に起こり得る負荷変動を与えた場合である。

⑥急速前後進切換

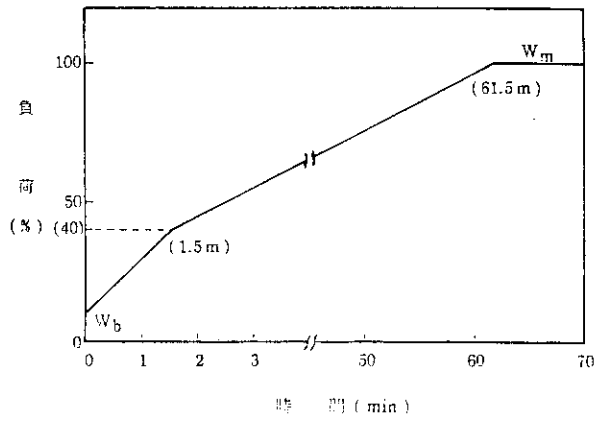
急速な前後進切換操作を行なった場合の主機操縦弁の応答には造船メーカーにより何種類かがあがあるが、そのうち「むつ」と同型式の応答を行なわせた場合の挙動を見る。急速前後進切換操作時に、前進側操縦弁は30秒で閉じ、後進側操縦弁は15秒のオーバーラップをもって30秒で開くという応答を想定している。今回の解析モデルでは一つの流量制御弁で全蒸気流量を制御するモデルを用いているので図2.1(6)に示すような負荷変化を与えることにより事象を模擬した。

Table 2.1 各負荷における原子炉出力レベルと蒸気流量割合

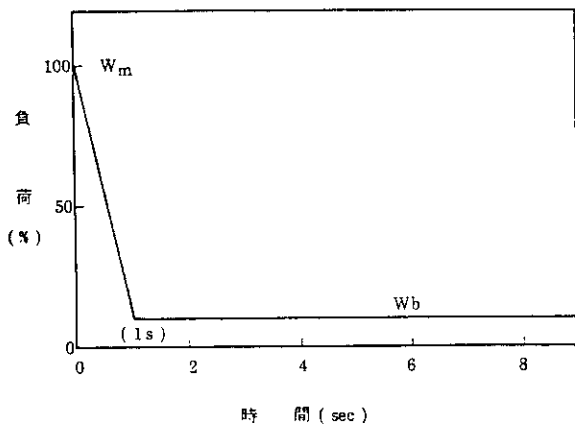
	原子炉出力 レベ ル	蒸気流量 割 合
前進全負荷	100%	100%
常用負荷	90%	90%
後進全負荷	80%	80%
基底負荷	10%	10%



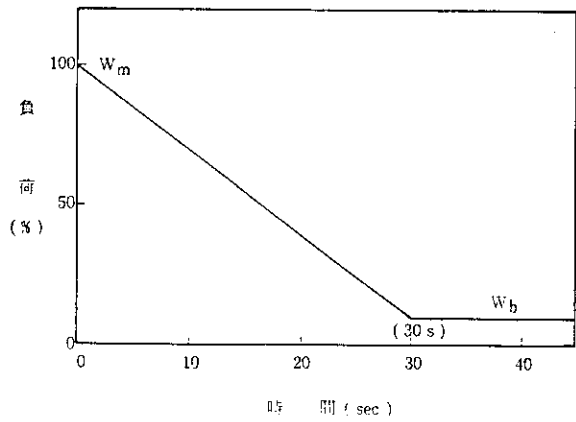
(1) 急速出力上昇



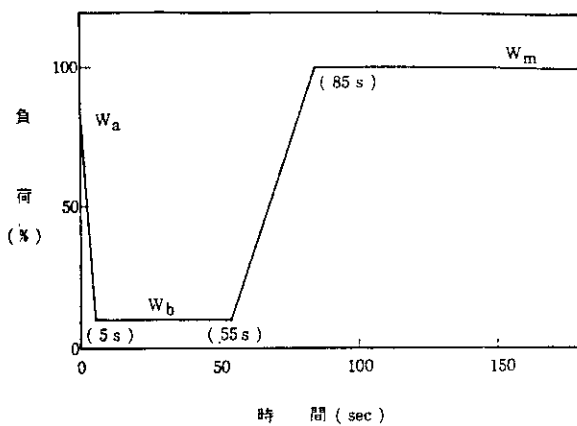
(4) 出力上昇



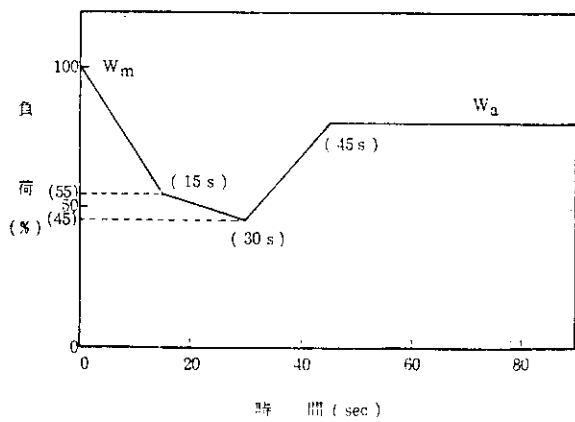
(2) 急速出力減少



(5) 出力減少



(3) 後前進切換



(6) 急速前後進切換

- W_m : 全負荷 (100%)
- W_n : 常用負荷 (90%)
- W_a : 後進全負荷 (80%)
- W_b : 基底負荷 (10%)

Fig. 2.1 負荷變動條件

3. 動特性解析モデル

3.1 使用解析コード

(1) 半一体型炉

半一体型炉の動特性解析には、「MARINE」コード^{*1}を用いた。

「MARINE」コードは、原子炉容器、高温側配管、低温側配管、蒸気発生器及び加圧器の一時冷却系の模擬及び中性子動特性、燃料-被覆材熱伝達をモデル化している。また、原子炉制御系、安全保護系等の模擬を含んでいる。

このコードは、原子力第一船（「むつ」）の事故解析にも使用された。

(2) 一体型炉

一体型炉の動特性解析には、「SIRENE」¹⁾コード^{*2}を用いた。

「SIRENE」コードは、フランスのCEAで開発されたコードで、原子炉炉心、一次冷却ポンプ、加圧器及びそれらを結ぶ流路の模擬及び中性子動特性、燃料-被覆材熱伝達をモデル化している。燃料としては、棒状燃料のいずれも取り扱うことが可能である。

また、原子炉制御系、安全保護系等の模擬を含んでいる。

(3) 自己加圧一体型炉

自己加圧一体型炉の動特性解析は、「DRUCK」²⁾コード^{*3}を用いた。

「DRUCK」コードは西ドイツGKSSで開発され「オットハーン」及びこれに続く原子力船計画に使用されたコードで、一次冷却系及び中性子動特性をモデル化している。また、原子炉制御系、安全保護系等のモデルが解析のために追加された。

3.2 核特性モデル

中性子の動特性は、全ての解析モデルにおいて遅発中性子を6群で近似した一点近似動特性方程式を用いて計算している。核特性に関するパラメータの設定は炉型が異なり同じには扱えなかったため炉型ごとに設定を行なった。以下、各炉型ごとに設定を記す。

(1) 半一体型炉

遅発中性子割合、遅発中性子寿命、各種反応度等の炉心パラメータをTable 3.2.1に示す。各種反応度係数については全寿命を通じて、過渡応答にとって最も厳しい組合せとして下記を選定した。

減速材温度係数	最小値（絶対値）
ドップラー係数	最小値（絶対値）
制御棒微分反応度	BOLの値（Fig 3.2.1）

脚注

- * 1 : 三菱原子力工業所有
- * 2 : 石川島播磨重工業株式会社所有
- * 3 : 日立造船株式会社所有

(2) 一体型炉

遅発中性子割合, 遅発中性子寿命, 各種反応度等の炉心パラメータをTable 3.2.2に示す。炉心のパラメータはBOL (炉心平均燃焼度0 MWD/tU, 平衡ゼノン) 及びEOL (炉心平均燃焼度30,400 MWD/tU, 平衡ゼノン) を対象に, それぞれについて制御棒微分反応度係数の最大値と最小値のを用いて行なった。減速材密度係数, ドップラー係数及び燃料熱伝導率については, 燃焼度に対応する値を用いた。本報告書の比較に当たっては解析結果より過渡応答にとって最も厳しい判断できる炉心パラメータBOLと制御棒微分反応度最小値の組合せを用いる。

(3) 自己加圧一体型炉

遅発中性子割合, 遅発中性子寿命, 各種反応度等の炉心パラメータをTable 3.2.3に示す。炉心のパラメータは全寿命を通じて過渡応答にとって最も厳しいと予想される炉心寿命初期の値を用いた。制御棒微分反応度は炉心寿命初期の平均値を用いた。

3.3 熱水力モデル

(1) 半一体型炉

解析の対象とする半一体型炉の概略図をFig 3.3.1に示す。解析モデルの概略図はFig 3.3.2に示す。燃料熱系は, 燃料ペレットを径方向に外部と内部の2領域, 被覆管を1領域として扱った。一次冷却系は, 炉心流路部, 炉心出入口混合部, 配管部, 蒸気発生器流路部等に分割した熱水力モデルとした。蒸気発生器は, 蒸気流量, 給水流量及び1次側からの伝達熱量の影響を含めたモデルとした。加圧器は, 液相, 気相の分割したモデルとし, ヒータ, スプレイ及び逃がし弁を模擬した。主蒸気系は, 前進及び後進操縦弁を考慮にいれた蒸気流量制御弁までを扱った。蒸気流量制御弁は主機タービンの操縦弁の構造を想定しており, その特性は, Fig 3.3.3に示すようにリフトと蒸気流量の関係として設定した。全蒸気流量の90%が主機タービンに流入する蒸気である。

解析に用いたプラントパラメータ等はTable 3.3.1に示すとおりである。半一体型炉では再循環式蒸気発生器を用いているため蒸気発生器の圧力により大きく変化する。他の炉型との比較では半一体型炉は一次系の保有水量が少ない。加圧器の制御設備の能力は一体型炉とほぼ同じで, 加圧器の容積は一体型炉に比べて大きい。蒸気ダンプ弁の容量は3炉型中最も小さい。

(2) 一体型炉

解析の対象とする一体型炉の概略図をFig 3.3.4に示す。

解析モデルの概略図はFig 3.3.5に示す。燃料温度はUO₂部を厚さ方向に4分割して求めた。一次系は, 原子炉炉心, 蒸気発生器, 加圧器及びこれらを結ぶ流路より構成する。蒸気発生器は向流型の貫流式でダウンコマ部及びコイル部に分割し, それぞれ, 一次側流路, 伝熱管壁及び二次側流路で構成される。計算ではダウンコマ部を1分割, コイル部を30分割して行った。加圧器は液相部と気相部よりなる円筒形状で模擬し, スプレイ, コンデンサ, ヒータ及び逃がし弁を考慮した。主蒸気系は蒸気流量制御弁及び主蒸気ダンプ弁までを扱った。蒸気流量制御弁は主機タービン操縦弁と主機タービン以外へいく蒸気の制御する各種の弁を一つの制御弁で代表させた。一体型炉では貫流式蒸気発生器を用いており蒸気圧一定の制御を行なうので蒸気過熱度は出力により変化する。蒸気発生器出力と蒸気流量の関係を示した図をFig 3.3.6に, 蒸気発生器出力と蒸気流量制御弁開度及び蒸気過熱度の関係をFig 3.3.7に示す。

解析に用いたプラントパラメータ等はTable 3.3.2に示す。一体型炉では向流型の貫流式蒸気発生器を用いており、過熱度が42℃と他の2炉型に比べて大きい。加圧器においてはサージ水がコンデンサを通して加圧器液相へ流入することが特徴である。

(3) 自己加圧一体型炉

解析の対象とする自己加圧一体型炉の概略図をFig 3.3.8に示す。

解析モデルの概略図はFig 3.3.9に示す。燃料棒モデルは燃料ペレット、被覆管からなる2領域モデルである。一次系は、炉心、上部プレナム、チムニー、蒸気発生器、ポンプ入口部、アニュラス部及び下部プレナムからなる。加圧器は、存在せず、チムニー及び蒸気ドーム部が自己加圧器として機能する。蒸気ドーム部はチムニーの一部でありチムニーと水面により隔てられている。蒸気ドームは蒸発、凝縮によりチムニーと冷却材のやりとりを行なう。蒸気発生器は並行流型の貫流式で余熱部、沸騰部、過熱部の3領域に分割した。主蒸気系は蒸気流量制御弁及び主蒸気ダンプ弁までを扱った。蒸気流量制御弁は主機タービン以外へいく蒸気を制御する各種の弁を一つの制御弁で代表させた。

解析に用いたプラントパラメータ等をTable 3.3.3に示す。自己加圧一体型炉では貫流式蒸気発生器を用いて蒸気圧力一定制御を行なっており、過熱度は出力によって変化する。他の炉型との比較では、加圧器を持たないこと、加圧器に相当するチムニー部、蒸気ドーム部の容積が非常に大きいことが特徴としてあげられる。蒸気ダンプ弁の容量は他の2炉型と比べて大容量である。

3.4 制御系モデル

3炉型の制御系計画について概要を記す。Fig 3.4.1に半一体型炉制御系統図を、Fig 3.4.2に一体型炉の原子炉制御系統図を、Fig 3.4.3に自己加圧一体型炉の原子炉制御系統図を示す。

基本的な構成は3炉型においてはほぼ一致しており、次の制御設備の一部もしくは全部よりなる。

- ① 制御棒制御系
- ② 加圧器圧力制御系
- ③ 加圧器水位制御系
- ④ 蒸気ダンプ制御系
- ⑤ 蒸気発生器給水制御系

半一体型炉は上記の全て制御設備が計画されている。一体型炉は通常運転時には加圧器の水位制御は行なわないものとし、③以外の制御設備が計画されている。加圧器を持たず、通常運転時には压力容器の水位制御を行なわない自己加圧一体型炉は②③以外の制御設備が計画されている。

半一体型炉の制御設備は陸上発電炉の経験に基づきほぼ同一方式の制御設備を構成している。一体型炉では負荷変動に対して積極的に制御を行なうことを計画している。自己加圧一体型炉では自己制御性を生かして制御設備は簡素なものを計画している。

以下、解析に用いられた制御系モデルに対して比較を行いながら記述する。

(1) 制御棒制御系

制御棒制御系は制御棒により、炉心の反応度を調整して、原子炉の出力制御を行なう。半一体型炉の解析モデルをFig 3.4.4に、一体型炉の解析モデルをFig 3.4.5に、自己加圧一体型炉の解析モデルをFig 3.4.6に示す。

半一体型炉及び一体型炉では一次冷却材の平均温度が一定となるように制御を行なう。一次冷却材

平均温度一定方式では、全運転出力に亘って一次冷却材平均温度を一定に維持するので本質的に一次冷却材は一定となり、加圧器の容量が少なくすむ等、船体設計に有利である。自己加圧一体型炉では压力容器の圧力を一定に制御することにより炉心出口温度を一定に保つ。

半一体型炉の制御棒駆動信号は、一次冷却材平均温度信号と出力不一致信号により構成される。半一体型炉においては、一次冷却材平均温度信号が主たる信号であり、出力不一致信号は負荷変動時の即応性と安定性を改善するために設けられている。出力不一致信号には中性子出力とタービン出力を用いた。実際の船用炉プラントにおいては、基底負荷分は主機タービン以外で消費されるもので補正が必要である。

一体型炉の制御棒駆動信号もまた、一次冷却材平均温度信号と出力不一致信号により構成される。一体型炉においても、一次冷却材平均温度信号が主たる信号であるが、負荷への追従では出力不一致信号が支配的である。出力不一致信号には中性子出力と蒸気流量を用いた。用いる蒸気流量には蒸気ダンプ流量が含まれているために、蒸気ダンプ弁が作動した場合出力不一致信号は小さくなる。

自己加圧一体型炉の制御棒駆動信号は、一次系圧力信号と蒸気流量信号よりなる。一次系圧力信号が主たる信号であり、蒸気流量信号は負荷変動時の応答性を改善するために設けられている。自己加圧一体型炉の制御棒制御系において他の2炉型と異なり、制御系の入力として中性子束信号を全く用いない。

制御棒の駆動速度は、半一体型炉及び一体型炉では制御棒駆動速度プログラムに従って変化する。解析モデルにおいてもこの制御棒駆動回路を忠実に模擬した。自己加圧一体型炉では3位置制御回路とフィードバック回路により制御棒の駆動平均速度を変化させる。解析モデルにおいては3位置制御器から制御棒の反応度までを含めてPI特性で近似し、制御系の不感帯は考慮していない。

(2) 加圧器制御系

加圧器の制御には、圧力制御と水位制御がある。

自己加圧一体型炉では、加圧器を持たないので加圧器制御設備による圧力制御は行なわないが、制御方式自体が一次系圧力一定方式であり原子炉出力の制御により圧力は一定に保たれる。半一体型炉及び一体型炉の圧力制御設備は共通のものとして、比例ヒータ、後備ヒータ、スプレイ、逃がし弁がある。一体型炉ではこの他に、加圧器コンデンサを有している。半一体型炉の圧力制御設備をFig 3.4.7に、一体型炉の圧力制御設備をFig 3.4.8に示す。

自己加圧一体型炉の压力容器水位制御及び一体型炉の加圧器水位制御は通常出力運転時には行なわれない。一体型炉においてのみ全出力領域において水位制御が計画され、解析モデルに取り入れられた。

(3) 蒸気ダンプ制御系

蒸気ダンプ弁の作動は、3炉型ともに開度調整によるダンプ流量制御が計画され、半一体型炉では更にon-off制御が備えられている。半一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデルをFig 3.4.9に、一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデルをFig 3.4.10に、自己加圧一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデルをFig 3.4.11に示す。

半一体型炉及び一体型炉では、蒸気圧力チャンネルと出力不一致チャンネルよりなり、自己加圧一体型炉では蒸気圧力チャンネルよりなる。出力不一致チャンネルは、急激な負荷減少時の蒸気発生器水位の低下を抑制するため、負荷減少直後にダンプ弁を作動させる目的で計画された一次系と二次系の出力不一致信号によるチャンネルである。半一体型では、不必要なダンプ弁の作動を防止するために負荷急減インターロックが計画され解析モデルでも考慮した。

蒸気ダンプ弁の容量は炉型により大きく異なり、半一体型炉で定格蒸気流量の20%、一体型炉で

約41%、自己加圧一体型炉では100%を解析において使用した。蒸気ダンプ容量は自己加圧一体型炉が際だって大きい。

(4) 給水流量制御系

半一体型炉は再循環式蒸気発生器を用いており、一体型炉及び自己加圧一体型炉は貫流式蒸気発生器を用いているため、前者と後者とで給水流量の制御方式が異なる。半一体型炉の給水制御系モデルをFig 3.4.12に、一体型炉の給水制御系モデルをFig 3.4.13に、自己加圧一体型炉の給水制御系モデルをFig 3.4.14に示す。

半一体型炉では、蒸気発生器の水位を設定値に保つ制御が行なわれる。蒸気発生器の設定水位は出力により異なる。(Table 3.3.1参照)一体型炉及び自己加圧一体型炉では、蒸気圧力を一定に保つ制御が行なわれる。一体型炉と自己加圧一体型炉の制御系構成はほぼ同じであるが、一体型炉においては給水減少率可変リミッターが計画され解析においてもモデル化された。給水減少率可変リミッターは、急速で大幅な負荷減少時に炉出力と蒸気発生器出力にアンバランスが生じて一次系圧力が過大に上昇するのを防ぐために設けられる。この給水減少率可変リミッターは蒸気ダンプ制御系の出力不一致チャンネルの効果と併せて急速な負荷減少時の一次系への影響を緩和する。

3.5 安全保護系モデル

試設計において計画された原子炉スクラム信号の主なものをTable 3.5.1に示す。表中、○印はその信号が原子炉スクラム信号として計画されていることを示す。数値もしくは内容の記載のある項目を動特性解析において考慮した。半一体型炉と一体型炉では原子炉スクラム信号が概ね一致している。これは両者ともに加圧器別置きの強制加圧方式を採用していることにも起因するが、自己加圧方式が技術基盤として他の2炉型とは異なった西ドイツの「オットハーン」の経験にもとづいていることが主たる原因と考えられる。

Table 3.2.1 半一体型炉の炉心パラメータ

要 目	解析に用いた値
全遅発中性子割合	6.5×10^{-3}
遅発中性子寿命	14.9 μ sec
減速材温度係数	-36 pcm/ $^{\circ}$ C
ドップラー温度係数	-2.2 pcm/ $^{\circ}$ C
制御棒反応度 (制御バンク合計)	Fig3.2.1参照 (~ 1.6 pcm/mm)
制御棒駆動速度	0.88 \sim 7.9 mm/sec

Table 3.2.2 一体炉の炉心パラメータ

要 目	解析に用いた値
全遅発中性子割合	6.95×10^{-3} (BOL)*、 5.29×10^{-3} (EOL)
遅発中性子寿命	20 μ sec*、 24 μ sec
減速材密度係数	-42 \sim -33 pcm/kg/m ³ (BOL)* -18 \sim -12 pcm/kg/m ³ (EOL)
ドップラー温度係数	-3.1 \sim -1.8 pcm/ $^{\circ}$ C (BOL)* -5.8 \sim -4.1 pcm/ $^{\circ}$ C (EOL)
制御棒反応度 (1グループ4本合計)	1.6 pcm/mm (最小値)* 6.0 pcm/mm (最大値)
制御棒駆動速度	1.2 \sim 15 mm/sec

*：本報告書の比較検討に用いた条件

Table 3.2.3 自己加圧一体型炉の炉心パラメータ

要 目	解析に用いた値
全遅発中性子割合	7.0×10^{-3}
遅発中性子寿命	20.5 μ sec
減速材密度係数	37 pcm/kg/m ³
ドップラー温度係数	-5.5 \sim -2.3 pcm/ $^{\circ}$ C
制御棒反応度	4.9 pcm/mm
制御棒駆動速度	~ 16.6 mm/sec

Table 3.3.1 半一体型炉の解析に使用したパラメータ

項 目	解析に使用した値
(1) プラントパラメータ	
全熱出力	100,000 kw
一次冷却材定格圧力	110 kg/cm ² a
一次冷却材流量	3,000 t/hr
一次冷却材平均温度	283.3 °C
一次冷却材高温側温度 (定格時)	294.7 °C
一次冷却材低温側温度 (定格時)	271.8 °C
二次側蒸気温度 (定格時)	249.2 °C
二次側蒸気圧力 (定格時)	40.0 kg/cm ² a
// (基底負荷時10%)	64.3 kg/cm ² a
// (後進全負荷80%)	44.6 kg/cm ² a
給水温度	200.0 °C
加圧器水位	60.0 %
原子炉出力 (定格時)	100.0 %
// (基底負荷時10%)	10.0 %
// (後進全負荷80%)	80.0 %
蒸気流量・給水流量 (定格時)	100.0 % (185.0t/h)
// (基底負荷時10%)	10.0 %
// (後進全負荷80%)	80.0 %
蒸気発生器水位計水位 無負荷時	33.0 %
// 無負荷時~20%出力	33.0~53.0 %
// 20%出力以上	53.0 %
*1 制御棒位置 (定格時)	88.9 cm
(基底負荷時10%)	135.0 cm
(後進全負荷80%)	127.0 cm
(2) 幾何学的パラメータ	
原子炉容器内冷却材体積	15.0 m ³
加圧器容積	7.0 m ³
蒸気発生器二次側容積	15.05 m ³
(3) 制御設備能力等設定	
加圧器スプレイ流量	19.4×10 ³ kg/hr
加圧器逃がし弁容量	6.9×10 ³ kg/hr
比例ヒータ容量	31.25 kw
後備ヒータ容量	218.75 kw
蒸気ダンプ弁容量	37.0×10 ³ kg/hr

*1;全挿入;0cm、全引抜;150cm

Table 3.3.2 一体型炉の解析に使用したパラメータ

項 目	解析に使用した値
(1) プラントパラメータ	
全熱出力	100,000 kw
一次冷却材定格圧力	120 kg/cm ² a
一次冷却材流量	4,459 t/hr
一次冷却材平均温度	290.0 °C
炉心出口温度 (定格時)	297.5 °C
炉心入口温度 (定格時)	282.5 °C
二次側蒸気温度 (過熱度)	292.7 °C (42°C)
二次側蒸気圧力	41.0 kg/cm ² a
給水温度	185.0 °C
加圧器水位	51.7 %
原子炉出力 (定格時)	100.0 %
// (基底負荷時10%)	10.0 %
// (後進全負荷80%)	80.0 %
蒸気流量・給水流量 (定格時)	100.0 % (167.2 t/h)
// (基底負荷時10%)	10.0 %
// (後進全負荷80%)	79.7 %
(2) 幾何学的パラメータ	
炉心部容積	0.825 m ³
上部プレナム容積	2.53 m ³
下部プレナム容積	13.87 m ³
ダウンカム部容積	7.72 m ³
加圧器容積	4.91 m ³
サージライン容積	0.025 m ³
その他	10.43 m ³
(3) 制御設備能力等設定	
加圧器コンデンサ伝熱面積	9.67 m ²
加圧器スプレイ流量	18.0×10 ³ kg/hr
加圧器逃がし弁容量	8.0×10 ³ kg/hr
比例ヒータ容量	44.6 kw
後備ヒータ容量	195.4 kw
蒸気ダンプ弁容量	69.0×10 ³ kg/hr

Table 3.3.3 自己加圧一体型炉の解析に使用したパラメータ

項 目	解析に使用した値
(1)プラントパラメータ	
全熱出力	100,000 kw
一次冷却材定格圧力	98.4 kg/cm ² a
一次冷却材流量	3,773 t/hr
炉心出口温度 (定格時)	308.0 °C
炉心入口温度 (定格時)	292.0 °C
二次側蒸気温度 (過熱度)	
(定格時)	287.7 °C (26°C)
(基底負荷時10%)	291.7 °C (30°C)
(後進全出力80%)	312.7 °C (51°C)
二次側蒸気圧力	44.8 kg/cm ² a
給水温度	210.0 °C
原子炉出力 (定格時)	100.0 %
// (基底負荷時10%)	10.0 %
// (後進全負荷80%)	80.0 %
蒸気流量・給水流量 (定格時)	100.0 % (180.0 t/h)
// (基底負荷時10%)	9.6 %
// (後進全負荷80%)	78.4 %
(2)幾何学的パラメータ	
炉心部容積	0.9 m ³
上部プレナム容積	10.7 m ³
下部プレナム容積	2.3 m ³
アニュラス部容積	24.6 m ³
蒸気発生器容積	6.2 m ³
ポンプ入口部容積	12.9 m ³
チムニー部容積	20.9 m ³
蒸気ドーム部	7.8 m ³
(3)制御設備能力等設定	
蒸気ダンプ弁容量	180.0×10 ³ kg/hr

Table 3. 5. 1 原子炉スクラム信号一覧と解析に用いた値

原子炉スクラム信号	半一体型炉	一体型炉	自己加圧 一体型炉
線源領域中性子束高	○	○	○
中間領域中性子束高	○	○	○
出力領域中性子束高（低設定）	○	○	○
出力領域中性子束高（高設定）	○	120 %	110 %
過大出力 ΔT 高	可変		
過大温度 ΔT 高	可変		
熱的余裕不足		15 °C	
炉心出口温度高			319 °C
一次冷却水流量低	○	○	○
原子炉圧力高 (kg/cm ² a)	122.0	130.5	114.0
原子炉圧力低 (kg/cm ² a)	○	101.0	
蒸気発生器水位低	5.0 %		
加圧器水位高	90 %	79 %	
出力領域中性子束変化率高	○		
制御棒落下		○	
制御棒グループ間位置差過大		○	
非常用注水信号 (S I 信号)	○	○	○
原子炉容器内水位低			2 m 低下
給水管・蒸気管内圧力変化大			○
蒸気管内 N 16 放射能高			○
ウェットウェル水位低・水温高			○
船体傾斜過大	○	○	
手動	○	○	○

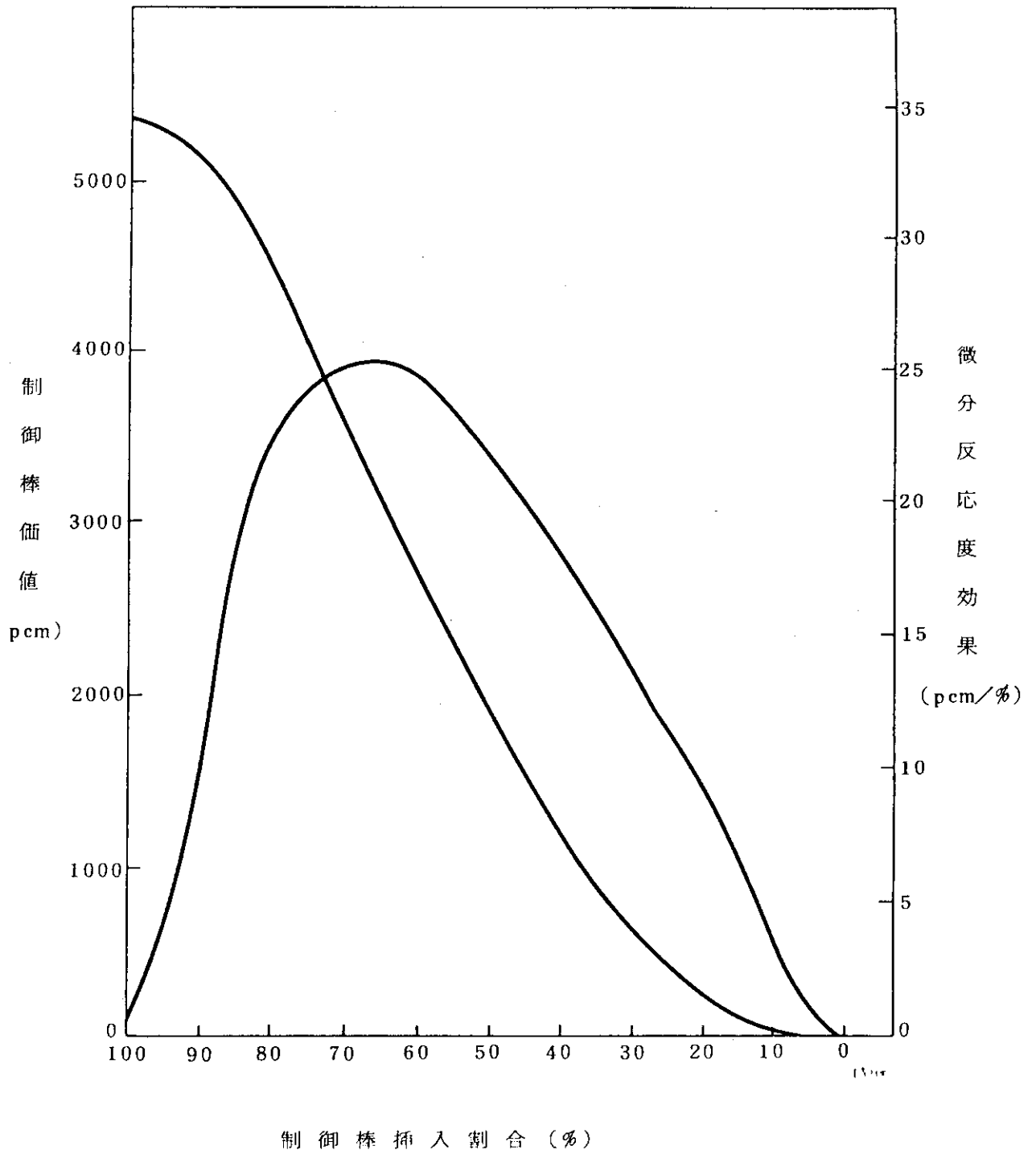


Fig. 3.2.1 半一体型炉の制御用バンク反応効果曲線

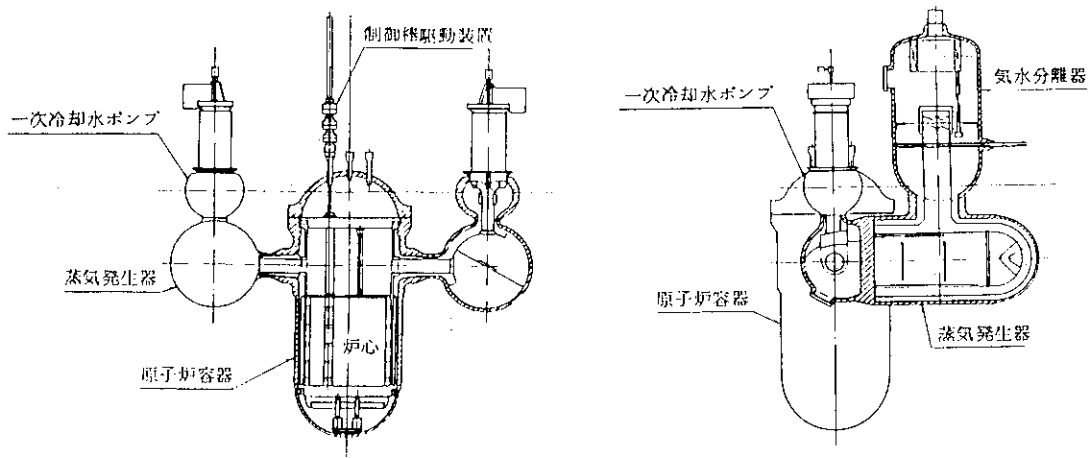


Fig. 3.3.1 半一体型炉本体概略図

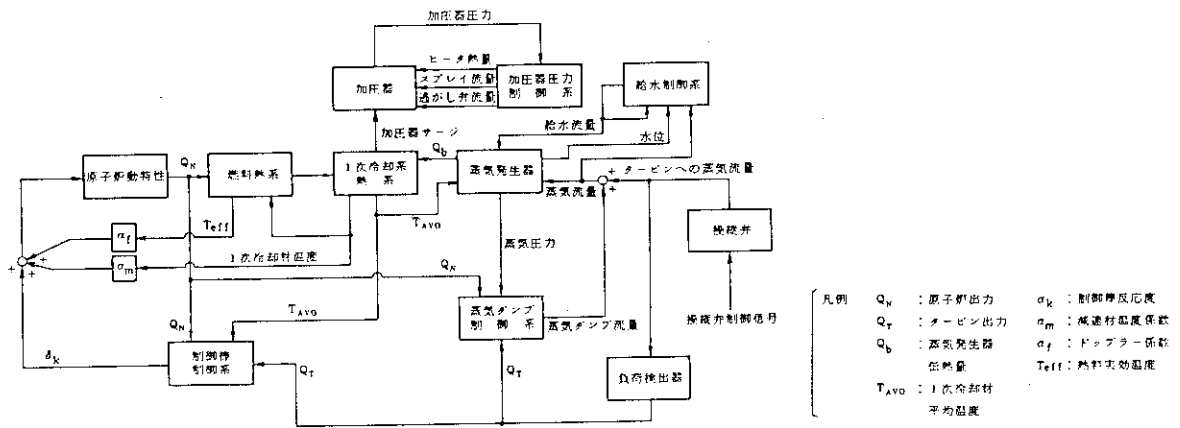


Fig. 3.3.2 半一体型炉解析モデル概略図

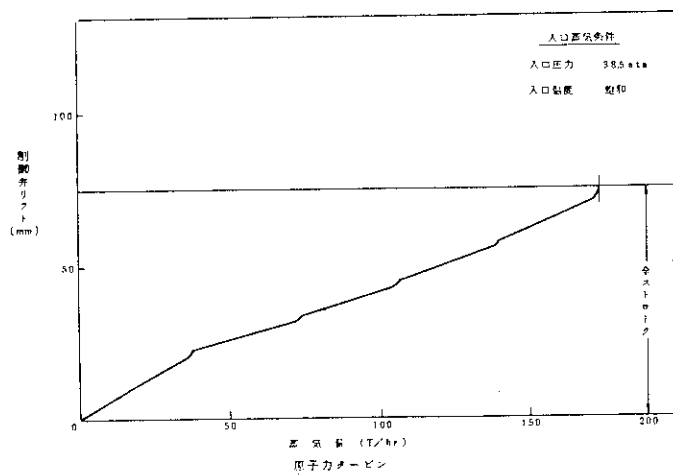


Fig. 3.3.3 蒸気流量VS制御弁リフト

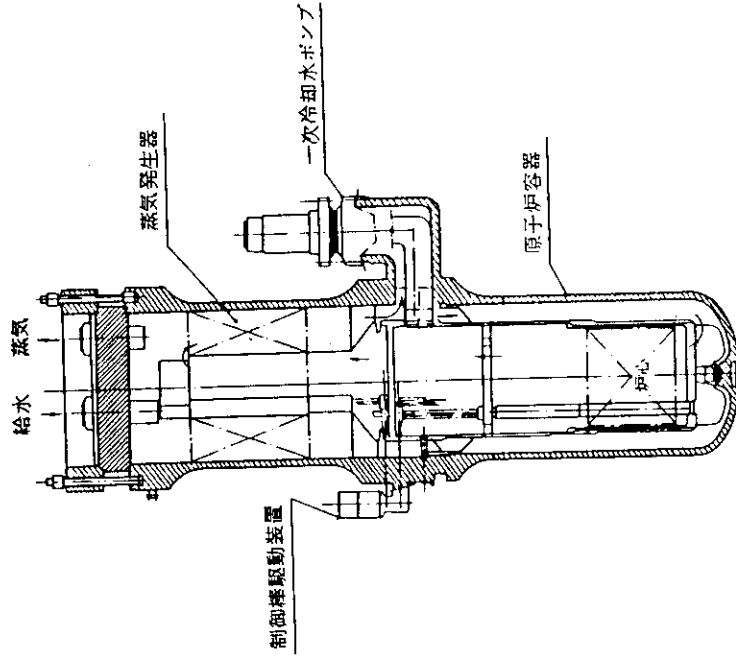


Fig. 3.3.4 一体型炉原子炉本体概略図

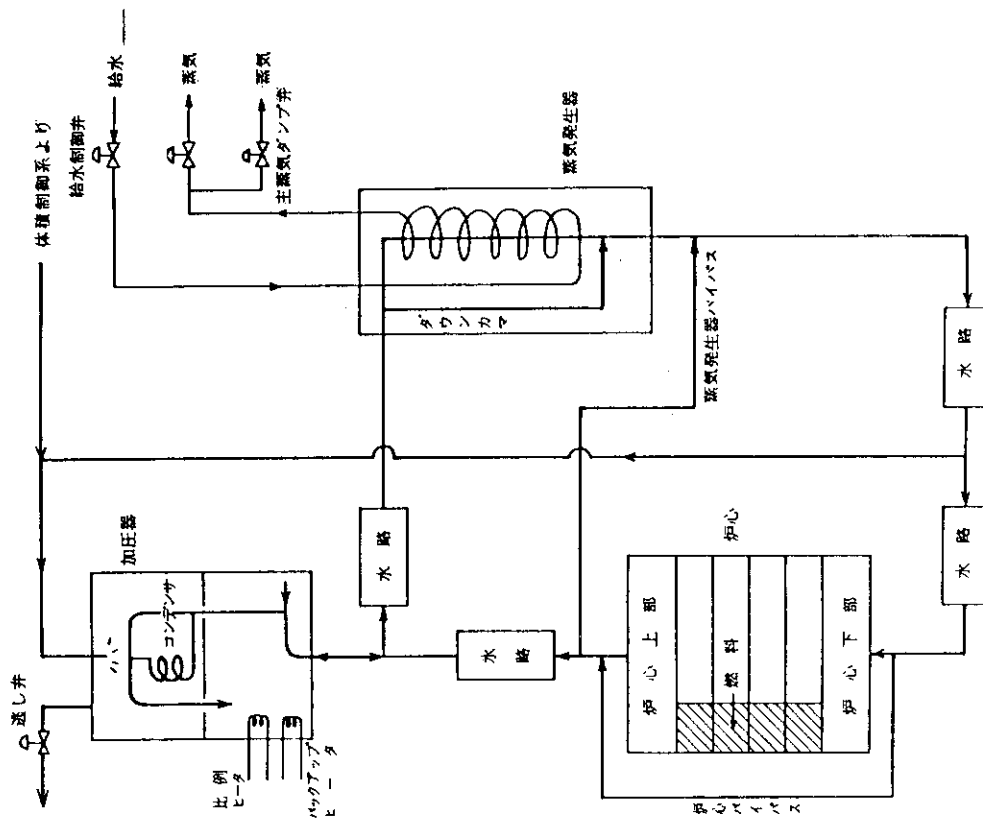


Fig. 3.3.5 一体型炉の炉プラント解析モデル

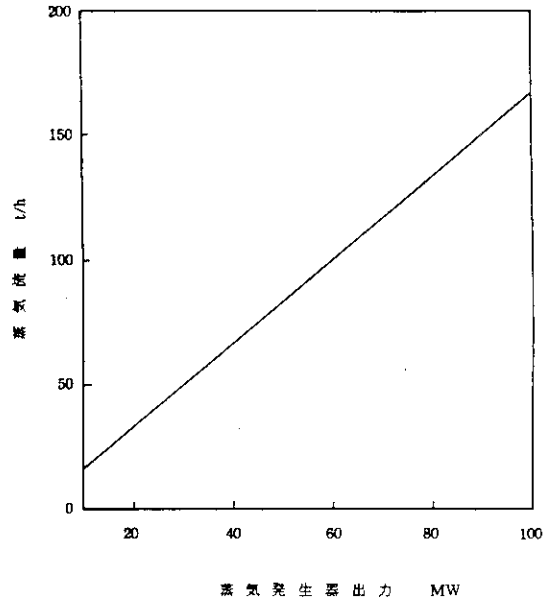


Fig. 3.3.6 一体型炉蒸気発生器出力と蒸気流量の関係

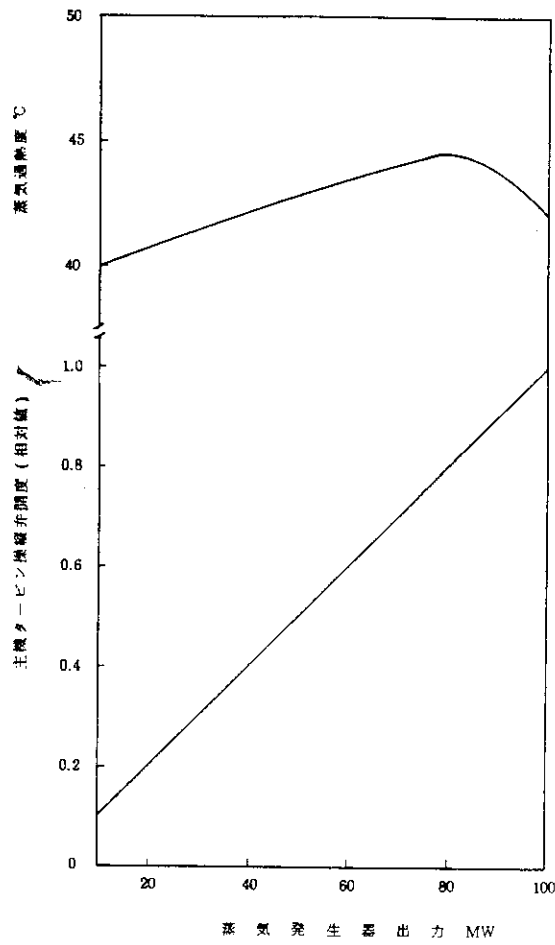


Fig. 3.3.7 一体型炉蒸気発生器出力と主機タービン操縦弁開度および蒸気過熱度の関係

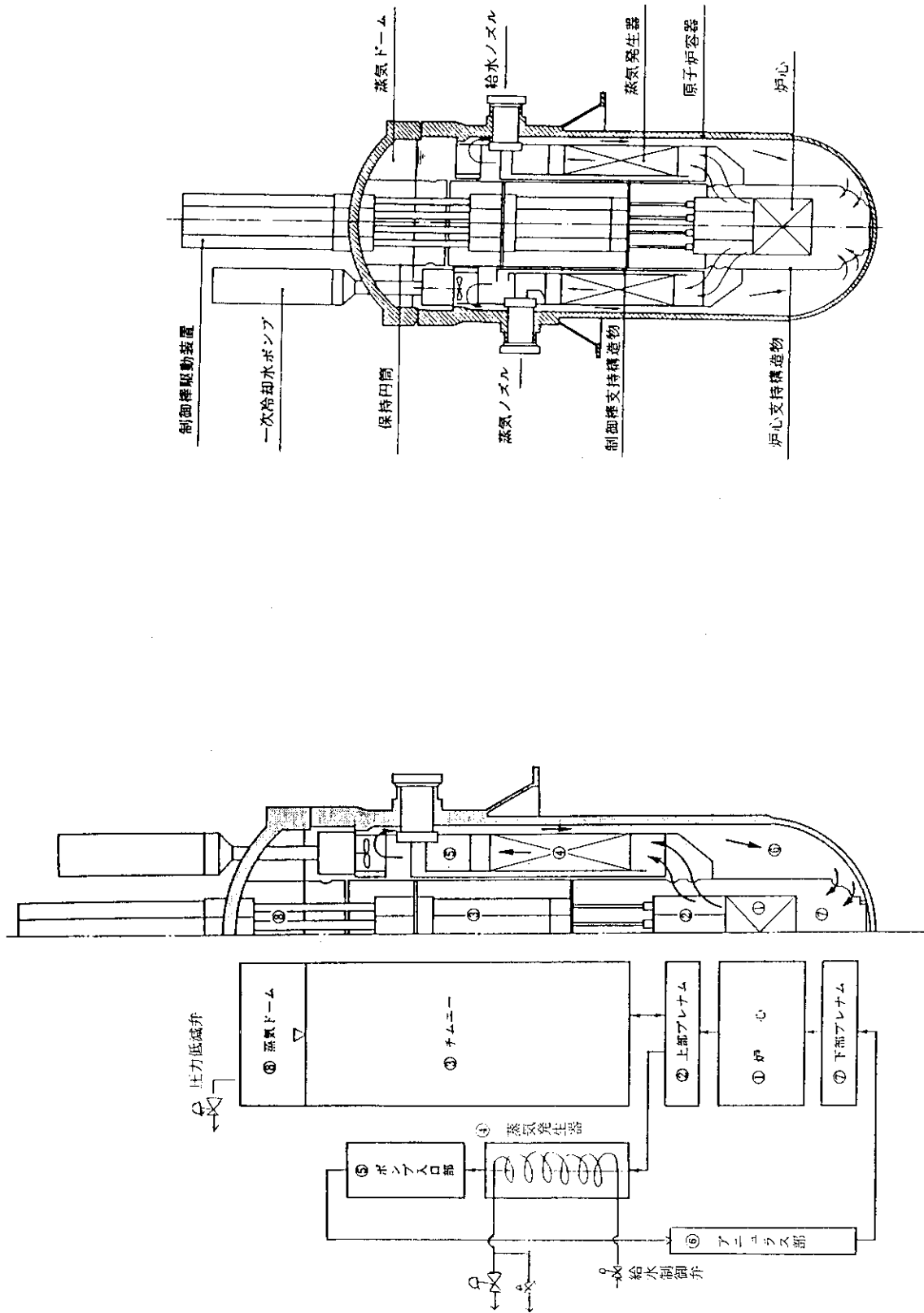


Fig. 3.3.8 自己加圧一体型炉原子炉本体組立図

Fig. 3.3.9 自己加圧一体型炉解析モデル図

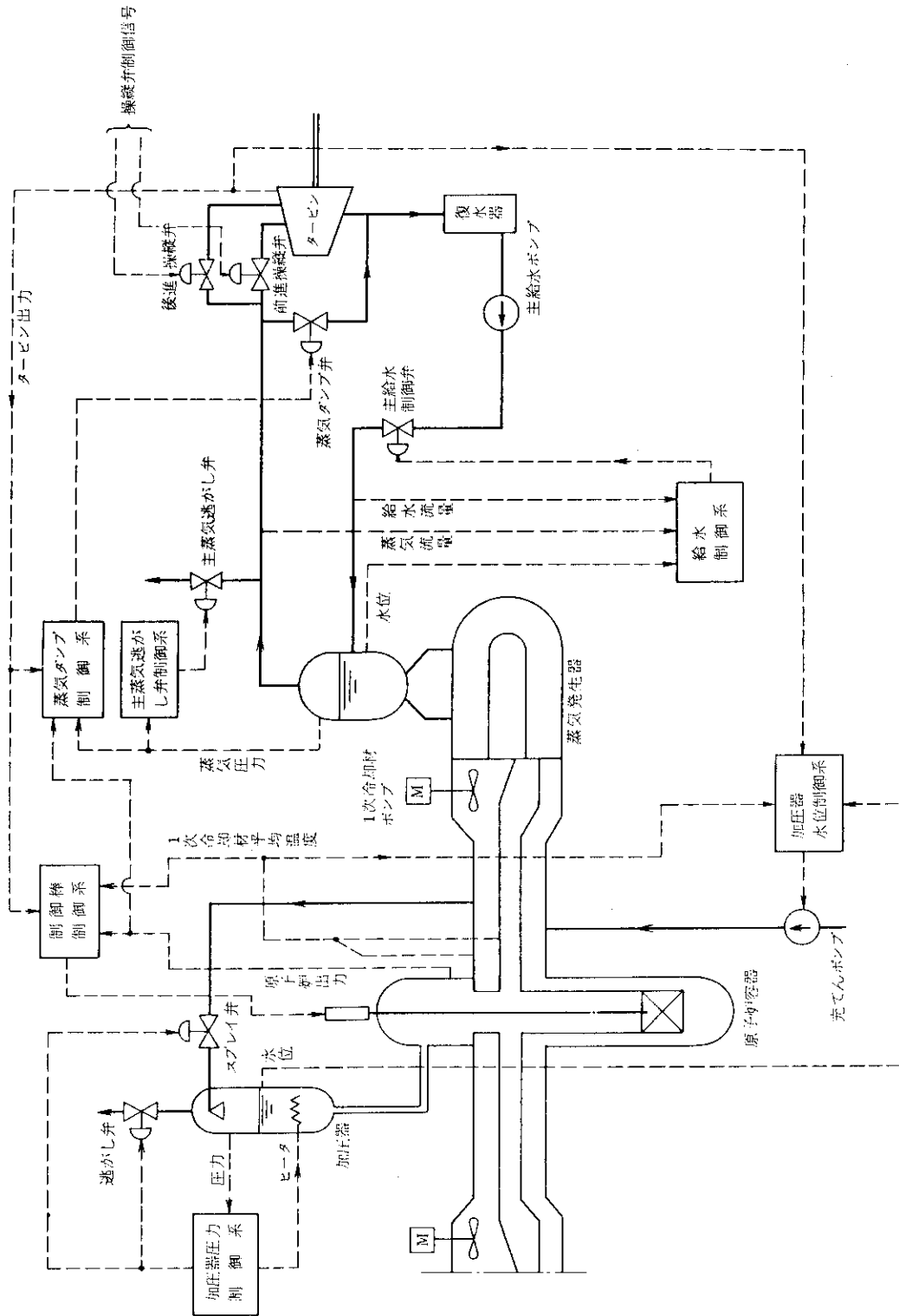


Fig. 3.4.1 半回路型原子炉制御系統図

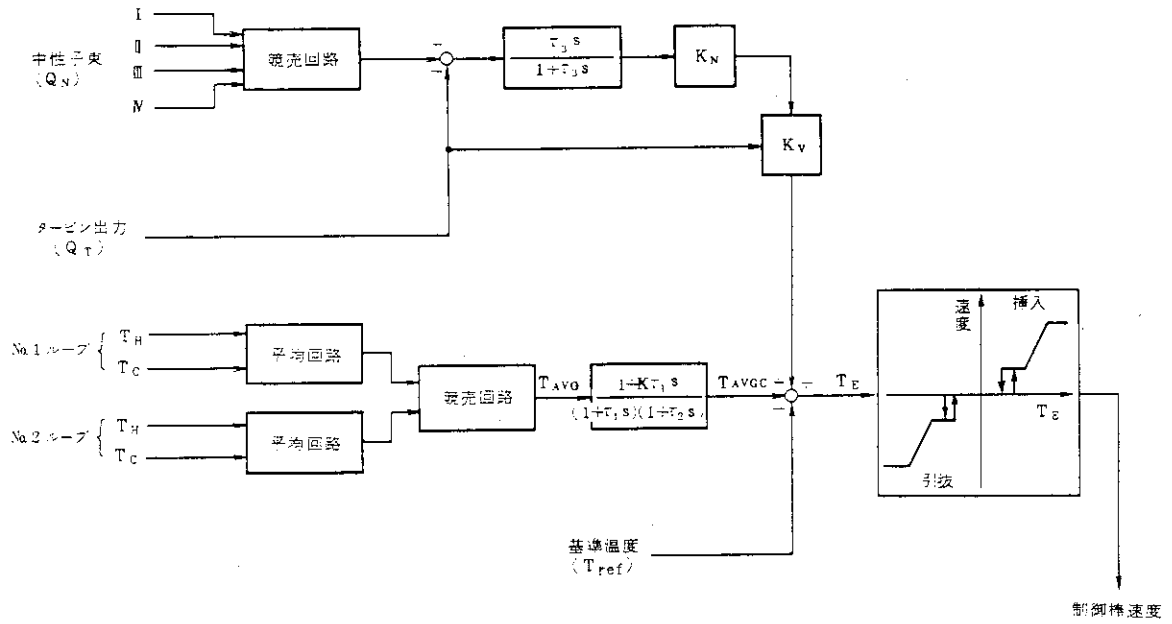


Fig. 3.4.4 半一体型炉の制御棒制御系モデル

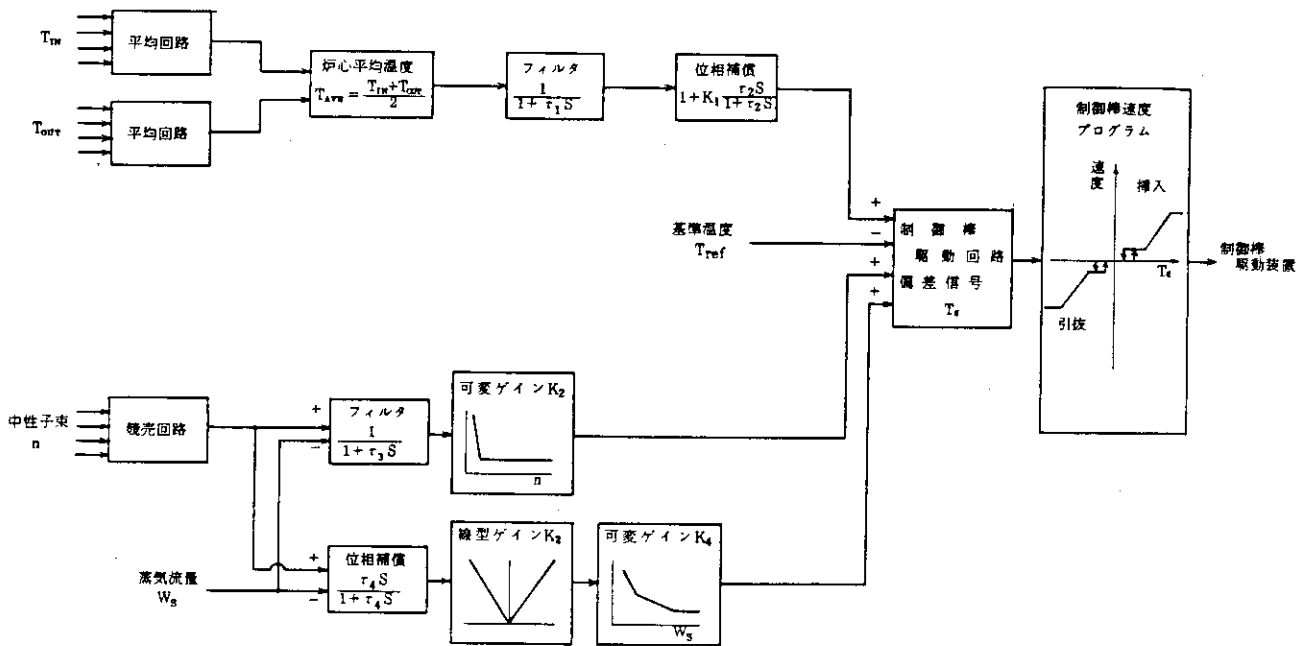


Fig. 3.4.5 一体型炉の制御棒制御系モデル

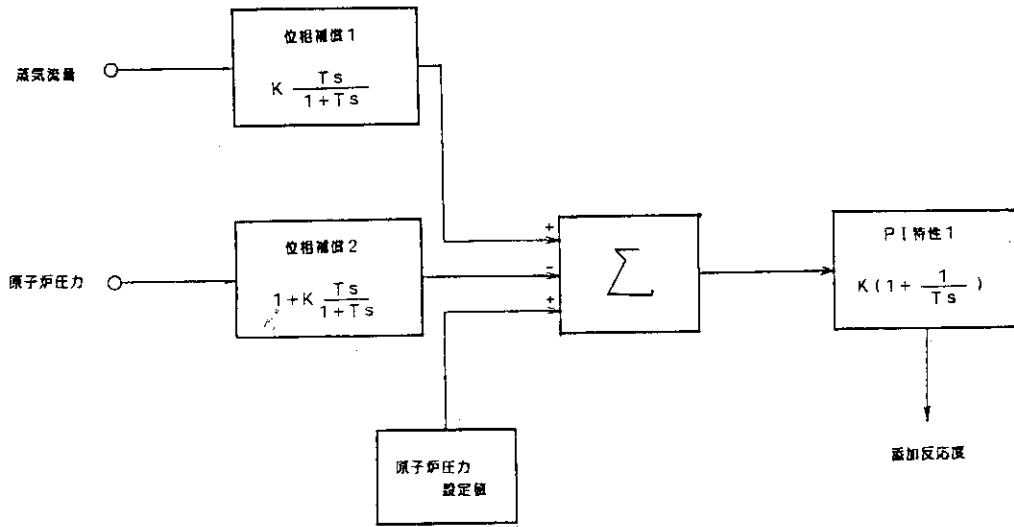


Fig. 3.4.6 自己加圧一体型炉の制御棒制御系モデル

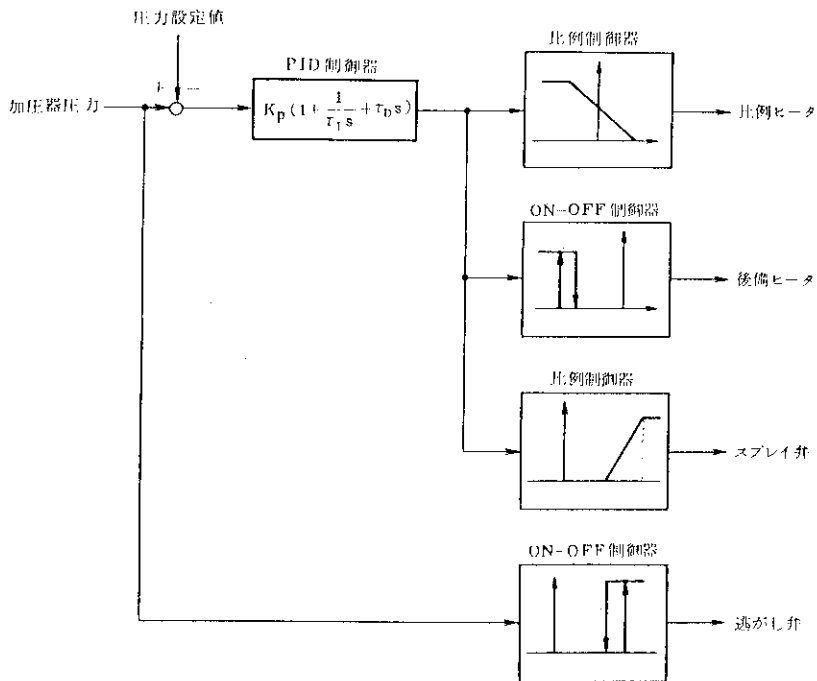


Fig. 3.4.7 半一型炉の加圧制御系モデル

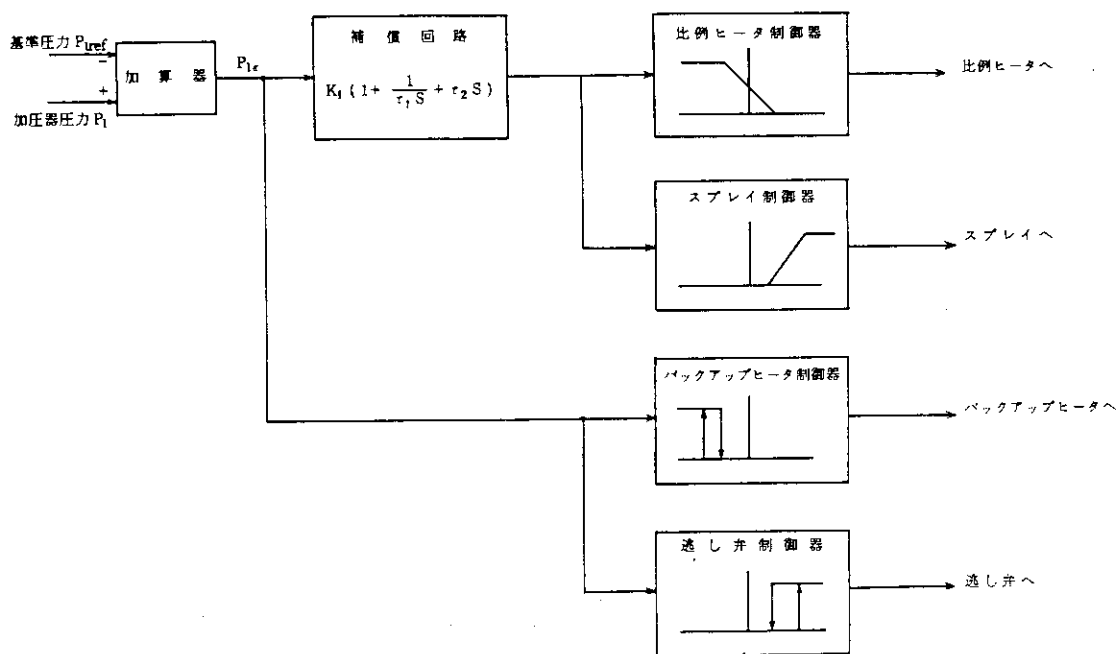


Fig. 3.4.8 一体型炉の加圧器圧力制御系モデル

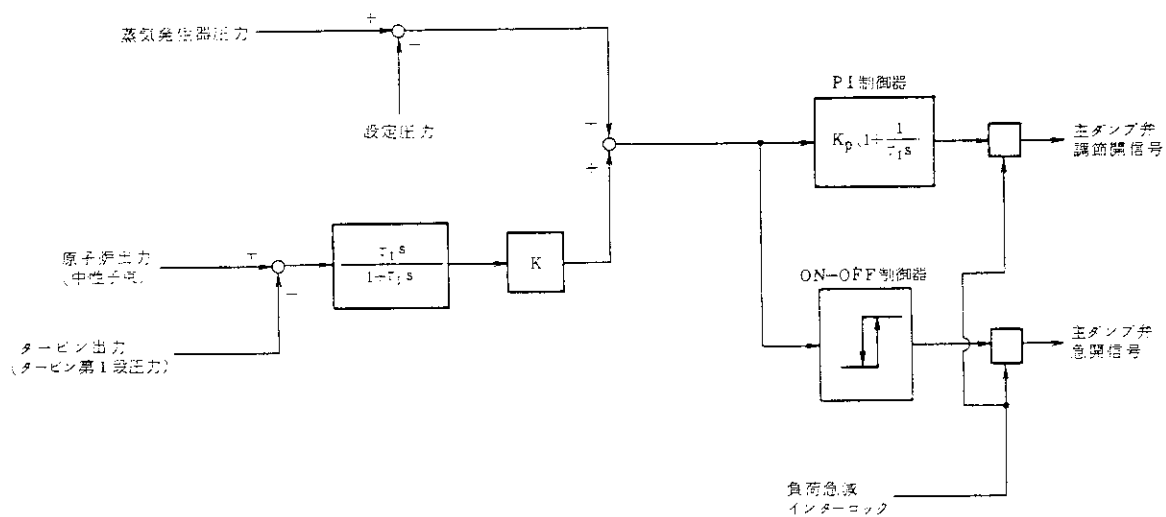


Fig. 3.4.9 自己加圧一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデル

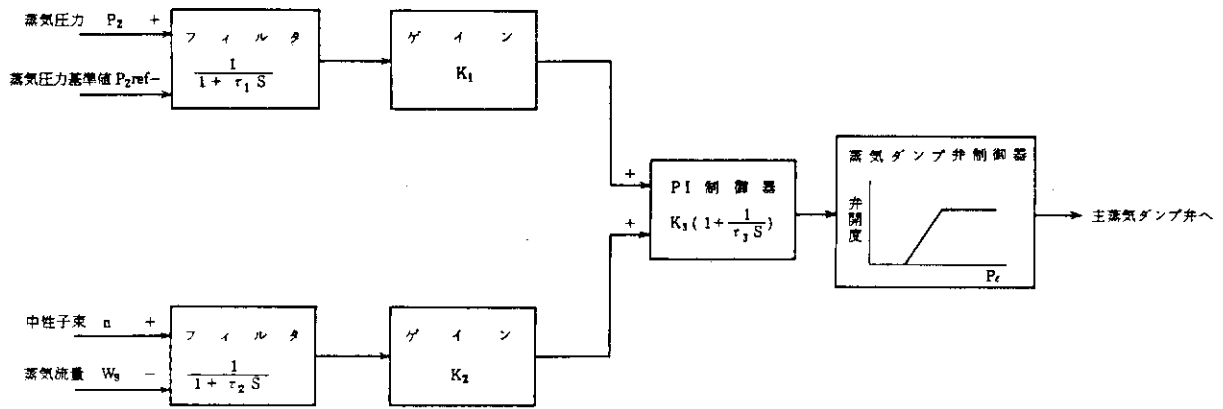


Fig. 3.4.10 一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデル

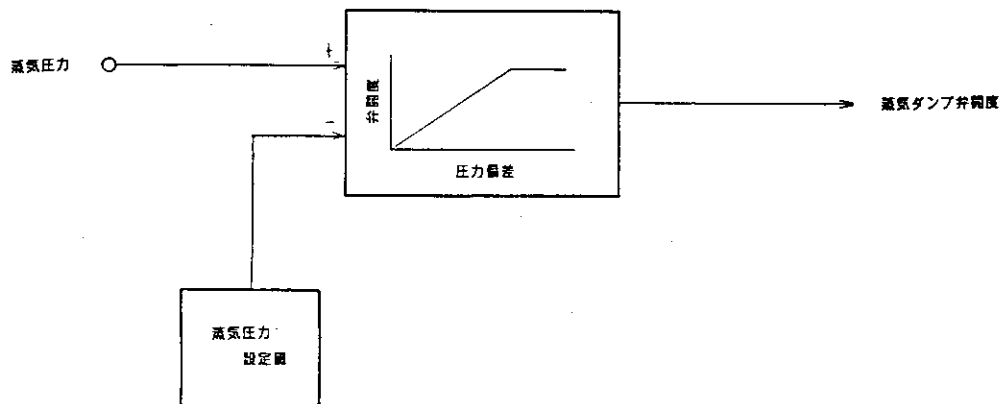


Fig. 3.4.11 自己加圧一体型炉の蒸気ダンプ制御系モデル

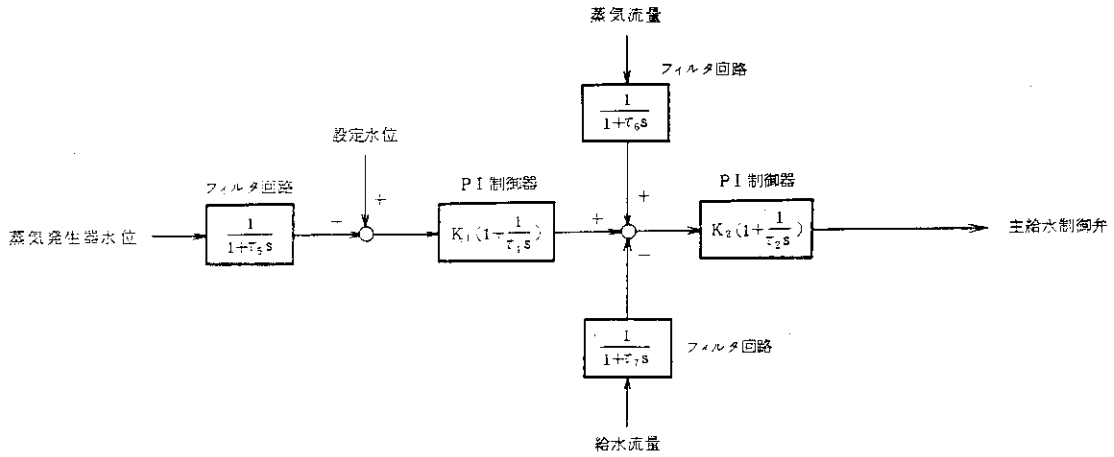


Fig. 3.4.12 半一体型炉の給水制御系モデル

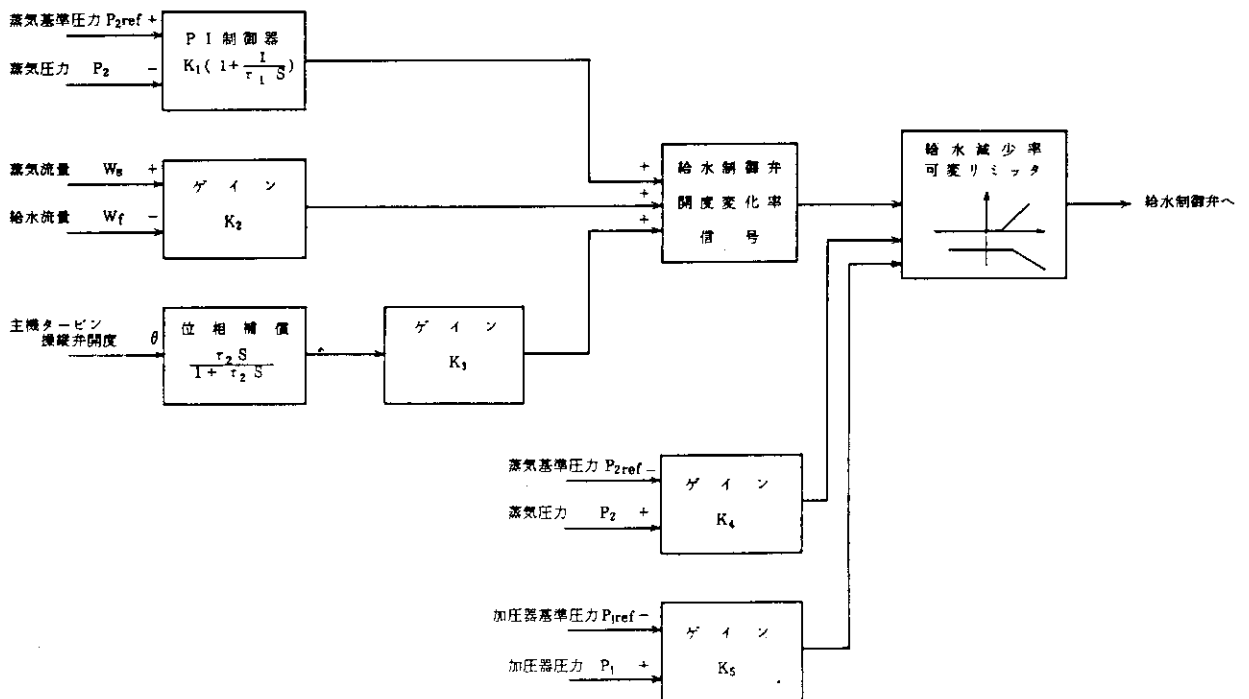


Fig. 3.4.13 一体型炉の給水制御系モデル

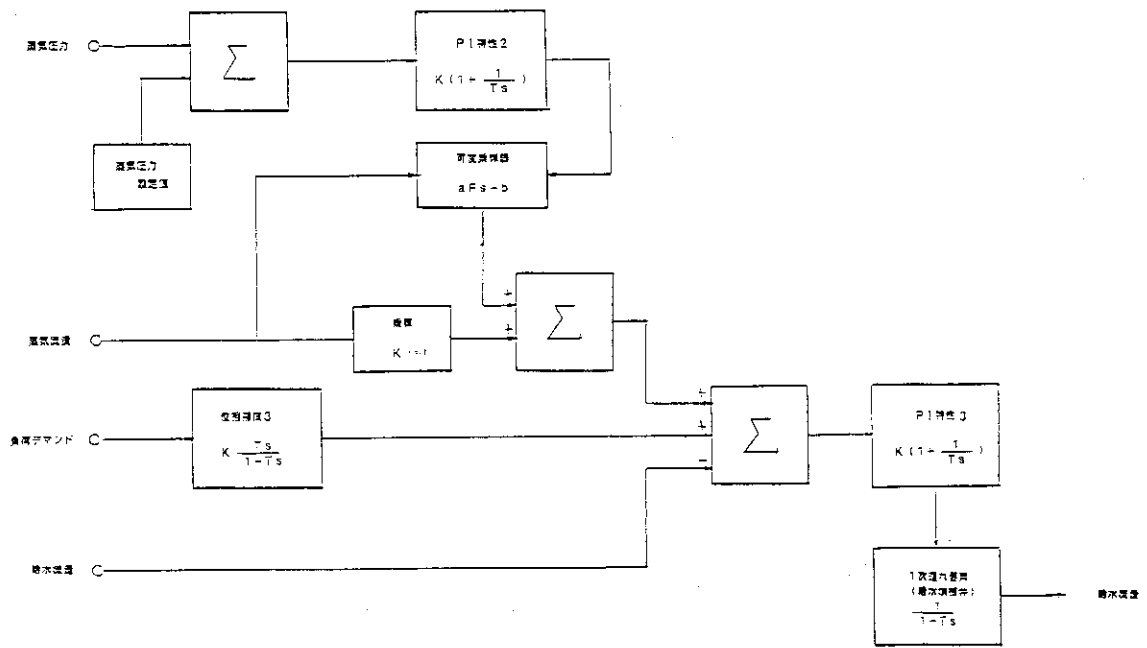


Fig. 3.4.14 自己加圧一体型炉の給水制御系モデル

4. 解析結果の比較

本節では、各種負荷変動を与えた場合の過渡変化の解析結果を示す。試設計の段階では、各試設計炉の制御系は最適化が行なわれていない。最適化が行なわれれば若干の制御性の向上が達成できると考えられるが各炉の制御特性が大幅に変わるとは考えられない。また、現在の設定において各試設計炉は、設計条件として与えられた負荷変動に対して速やかに追従し、想定したスクラムに対して十分な余裕を持って運転可能であることが動特性解析により明らかにされた。

本報告書の目的は、試設計3炉型の動特性の比較・評価であるので解析結果は、極力3炉型の比較を行ないやすい形で整理した。各節において主として原子炉出力、蒸気流量の変化を比較した。各炉において制御の対象となっている主たるパラメータについては解析結果を図で示している。また、過渡変化中の3炉型のパラメータの変化を表として示した。

以下に、解析結果を負荷変動条件ごとにまとめて示す。

4.1 急速出力上昇

急速出力上昇時の原子炉出力の応答をFig 4.1.1に、蒸気流量の変化をFig 4.1.2に、3炉型比較して示す。Fig 4.1.1中の線は要求された蒸気流量を示している。Fig 4.1.3, Fig 4.1.4には半一体型炉の制御対象パラメータのうち一次冷却材平均温度、蒸気発生器水位を示す。Fig 4.1.5, Fig 4.1.6には一体型炉の制御対象パラメータのうち一次冷却材平均温度、主蒸気圧力を示す。Fig 4.1.7, Fig 4.1.8には自己加圧一体型炉の制御対象パラメータのうち原子炉圧力、蒸気圧力を示す。また、過渡変化中の各パラメータの変動幅をTable 4.1.1に示す。

Fig 4.1.1に見られるように、基底負荷から常用出力までの3%/secの負荷変化に対する原子炉出力の応答は炉型によりかなり異なる。

半一体型炉の原子炉出力の応答は3炉型中最も緩やかで、オーバーシュートすることなく、目標値に至っている。原子炉出力はまず、一次冷却材温度の低下(Fig 4.1.3)と出力不一致信号により急速に制御棒の引抜により上昇する。その後、出力不一致信号により一旦制御棒が挿入され、あとは主に平均温度信号により目標値にゆっくりと到達している。しかし、原子炉出力が要求された出力に達するまでに約300secを要しており他の2炉型に比べれば原子炉出力の追従は遅い。

一体型炉においては、制御棒の駆動は主に出力不一致信号によって行なわれ、原子炉出力の応答は3炉型中最も速い。一次冷却材温度の低下(Fig 4.1.5)は小さく、制御棒駆動プログラムの不感帯($\pm 1.4^{\circ}\text{C}$)程度しか変化していない。この時のオーバーシュートは13%にも達しており、過渡的に原子炉出力が要求負荷よりも先行して上昇している。このような特性は実際の運転においては運転員に恐怖感を与えるため、好ましくない。

自己加圧一体型炉では原子炉出力制御機構の時間遅れが大きく、原子炉出力の上昇開始は3炉型中最も遅いが出力上昇の傾きは半一体型炉と同程度である。約100secの時点では約6%のオーバーシュートが見られる。これは、自己加圧一体型炉が原子炉圧力一定制御を行なっていることに関係している。原子炉圧力は負荷の急激な増加に伴い低下し、低下した原子炉圧力を設定値に戻すために原子

炉出力のオーバーシュートが生じている。原子炉圧力を設定値に到達させる過程において、原子炉圧力が低下しており、原子炉出力が大きいので、明らかに炉心において部分沸騰が生じる。この部分沸騰は原子炉に負の反応度を添加し出力を抑制するので制御棒がさらに引き抜かれるという現象が生じている。このため、制御棒の引き抜き量は、微分反応度を考慮すると他の2炉型に比べて大きい。自己加圧一体型炉の制御棒制御には一次系の圧力（Fig 4.1.7）と蒸気流量信号が用いられているが、一体型炉とは対照的に一次系圧力信号が支配的である。

蒸気流量の変化はFig 4.1.2に見られるように貫流式蒸気発生器を用いる2炉型と再循環式蒸気発生器を用いる炉型とでは異なった特性が示されている。貫流式蒸気発生器を備える一体型炉と自己加圧一体型炉の蒸気流量はほぼ要求通りに変化しているのに対し、再循環式蒸気発生器を備える半一体型炉の蒸気流量は蒸気圧力と制御弁開度の関係から過渡的に約111%に達し、その後低下して300sec時点では要求された流量を下回っている。半一体型炉では蒸気流量の増加に伴い主蒸気圧力は大幅に低下し、蒸気発生器の水位は一旦増加した後大幅に低下する。（Fig 4.1.4）このような二次系の応答が原子炉出力の応答の緩やかさを補い蒸気流量はほぼ要求通りに確保される。しかし、二次系のパラメータには蒸気発生器水位のように負荷変動開始10分後においても設定値より大きく離れているものがある。貫流式蒸気発生器では二次系保有水量が少なく、主蒸気圧力一定の制御を行なうため、負荷の急増変動を二次系で補うことはできず一次系は速やかに出力を追従させねばならない。Fig 4.1.6, Fig 4.1.8に見られるように貫流式蒸気発生器の主蒸気圧力の変化は小さい。

Table 4.1.1に示されるように、半一体型炉では加圧器圧力、加圧器水位、一次冷却材平均温度等の一次系パラメータ、蒸気流量、蒸気発生器水位、主蒸気圧力等の二次系パラメータの変動が他に比べて大きい。一体型炉では多くのパラメータの変動は小さいが原子炉出力と給水流量の最大値が大きい。自己加圧一体型炉では制御棒の微分反応を考慮した場合、制御棒の最大引き抜き量が他に比べて大きい。

4.2 急速出力減少

急速出力減少時の原子炉出力の応答をFig 4.2.1に、蒸気流量の変化をFig 4.2.2に、3炉型比較して示す。Fig 4.2.1中の点線は要求された蒸気流量を示している。Fig 4.2.3, Fig 4.2.4には一体型炉の制御対象パラメータのうち一次冷却材平均温度、蒸気発生器水位を示す。Fig 4.2.5, Fig 4.2.6には一体型炉の制御対象パラメータのうち一次冷却材平均温度、主蒸気圧力を示す。Fig 4.2.7, Fig 4.2.8には自己加圧一体型炉の制御対象パラメータのうち原子炉圧力、主蒸気圧力を示す。また、過渡変化中の各パラメータの変動幅をTable 4.2.1に示す。

急速出力減少は事象としては、主機タービントリップに相当する。この時の原子炉出力の応答は3炉型間の傾向として急速出力上昇の場合と似ている。

半一体型炉の原子炉出力の応答は緩やかで約300secかかって目標値に至っている。原子炉出力はまず、一次冷却材平均温度の上昇と（Fig 4.2.3）出力不一致信号による制御棒の急速な挿入が行なわれる。その後、出力不一致信号により制御棒は一旦引き抜かれるが、一次冷却材平均温度が高いため再び挿入される。原子炉出力は制御棒の動作の影響で減少傾向が一次的に緩やかになるが整定に向かっている。この間原子炉において発生する余剰な熱は蒸気ダンプ弁、一次系温度の上昇、蒸気発生器二次側の水位の急速な上昇（Fig 4.2.4）と圧力上昇により吸収される。一次冷却材平均温

度は最大で9.4℃上昇しており300sec時点でも設定温度よりも高いが、一体型炉に見られるような原子炉出力の大幅なアンダーシュートの継続は見られない。この後、半一体型炉においても過渡的に、原子炉出力が最小値で7.1%まで低下するがアンダーシュートの幅は2.9%と小さい。

一体型炉の原子炉出力の応答は3炉型中最も速いが同時にオーバーシュートも大きく原子炉出力は最小値で2%まで低下する。原子炉出力は一次冷却材の温度上昇と（Fig 4.2.5）出力不一致信号により急速に挿入される。一次冷却材平均温度は最大で7.5℃上昇するが300sec時点ではほぼ設定値に落ちついている。原子炉出力は一次冷却温度が設定値よりも高い間は目標値を大きく下回っている。原子炉で発生する余剰な熱は、蒸気ダンプ弁と蒸気発生器二次側水の増加、一次冷却水の温度上昇により吸収される。応答がきわめて速く再循環式に比べ保有水の少ない貫流式蒸気発生器においては一次冷却材温度の整定は再循環式蒸気発生器を用いた場合よりも急がれるので、一体型炉では早期の大幅なアンダーシュートによりこれを図っている。

自己加圧一体型炉の原子炉出力の応答は速やかであるが100sec以降アンダーシュートが見られ計算範囲内では回復していない。急速に負荷の減少に伴い一次系圧力が（Fig 4.2.7）上昇する。原子炉出力は一次系の圧力信号と蒸気流量信号による制御棒の急速な挿入により急速に低下するが、原子炉圧力は原子炉出力が負荷を下回らないと低下しない。蒸気ドーム内の蒸気は断熱圧縮により過熱されとおり、解析モデルでは蒸気ドームからの除熱を無視しているので、蒸気ドーム内で凝縮が起こらず、原子炉圧力の低下は遅い。原子炉圧力が高いままとなるので原子炉出力は目標値を下回り続け炉心出口温度も低下を続ける。出力減少においては、炉心入口においては、炉心入口温度は高くなるものの、初期の圧力上昇が大きく原子炉出力が低下するので炉心内の気泡がつぶれ、炉心減速材密度が高くなり正の反応が添加される。制御棒は、この反応度を補償するために、制御棒は急速に挿入され、完全挿入位置に達する。

蒸気流量の変化は全炉型において互いに異なる。半一体型炉では主蒸気ダンプ弁が負荷変動直後と160sec頃からの2回作動する。負荷変動直後には基底負荷分の10%と主蒸気ダンプ弁20%の合計30%が消費されている。蒸気流量は、300sec頃にはほぼ要求値に落ちついているが、蒸気発生器水依は600sec時点でも設定値の33%を大きく上回っている。一次冷却水平均温度も設定値に至っていない。一体型炉では蒸気圧力が負荷変動直後に約14Kg/cm²高くなっており、蒸気流量は主機タービン以外に流入する蒸気量が定格値を上回るので主蒸気ダンプ弁の容量との合計は両者の定格値の和以上になっている。また、確保される蒸気流量の総量は3炉型中最も多い。一体型炉では蒸気ダンプを行なうとともに、給水減少率可変リミッタを給水制御系に設け、急速な負荷変動時に蒸気発生器二次系保有水量を増加させ除熱量を確保している。これらの方法と原子炉出力の速い応答により一次系保有水量が比較的少ないにもかかわらず、一次冷却材平均温度の上昇を小さく抑えている。自己加圧型一体型炉では負荷変動とほぼ同時に主蒸気ダンプ弁が作動している上に、主ダンプ容量として定格蒸気流量の100%が計画されているためその最高圧力は約5Kg/cm²と一体型炉と比べてかなり小さい。蒸気流量は約20secで要求流量を変化させたように減少する。

半一体型炉については更に、制御棒不作動の場合の急速出力減少、蒸気ダンプ弁不作動の場合の急速出力減少についても解析を行なっている。制御棒不作動を仮定した場合、蒸気流量は16%程度、原子炉出力は20%程度で整定する。一次冷却材平均温度の上昇は制御棒作動の場合に比べて大きく、蒸気流量が整定した後も上昇したままとなる。蒸気ダンプ弁の不作動を仮定した場合、蒸気発生器の水位の過渡的な低下が大きくなり、主蒸気圧力が高いままとなるが、原子炉出力、蒸気流量ともに要

求値に落ちつく。半一体型炉においては制御棒、蒸気ダンプ弁のいずれかを不作動と仮定しても、加圧器逃し弁及び主蒸気安全弁の作動を伴わず、主機タービントリップに相当する負荷変動にはほぼ追従するという結果が得られた。

Table 4.2.1 に示すように半一体型炉の各パラメータの変動では、加圧器圧力の上昇と一次冷却材平均温度の変化が若干大きい。一体型炉では原子炉出力の最小値が他に比べて小さく、その影響で一次冷却材平均温度の低下が半一体型炉に比べて大きい。また、加圧器水位の上昇及び主蒸気圧力の上昇が大きい。自己加圧一体型炉では炉心出口の低下が大きく、制御棒移動距離は際だって大きい。

4.3 後前進切換

後前進切換時の原子炉出力の応答を Fig 4.3.1 に、蒸気流量の変化を Fig 4.3.2 に、3 炉型比較して示す。Fig 4.3.1 中の点線は要求された蒸気流量を示している。Fig 4.3.3, Fig 4.3.4 には半一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、蒸気発生器水位を示す。Fig 4.3.5, Fig 4.3.6 には一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、主蒸気圧力を示す。Fig 4.2.7, Fig 4.2.8 には自己加圧一体型炉の制御パラメータのうち原子炉圧力、主蒸気圧力を示す。また、過渡変化中の各パラメータの変動幅を Table 4.3.1 に示す。

急速後前進切換時の原子炉出力の応答は、急速出力減少と急速出力上昇とを組み合わせたとような結果となった。

半一体型炉出力は負荷の急減と一次冷却材温度の上昇による制御棒の急速な引き抜きにより、減少して行くが 30% 程度まで低下した時点で負荷が急増するために上昇に向かう。Fig 4.3.3 に見られるように、一次冷却材温度は最大値と最小値の間で 6.7℃ 程変化するがゆっくりと整定に向かう。原子炉出力の変化は負荷の変化に対して大きく遅れることなく追従している。

一体型炉の原子炉出力の応答は主に出力不一致信号による急速な挿入と引き抜きにより速やかに変化している。制御棒の作動は 200sec までに終了するが、このために生じる原子炉出力のオーバーシュートは約 10% とかなり大きい。制御系の最適化によりこの傾向は若干緩和されるにしても出力の上昇速度は他の 2 炉型に比べて際だって速い。急速出力上昇の場合とともに燃料に要求される出力変化は負荷変動の速度よりも速い。一体型炉で急速な負荷変動を行なう場合、その影響は燃料に負担される。一体型炉においてはキャラメル燃料を用いることによりこの負荷変動に対処できるものとしている。

自己加圧一体型炉の原子炉の応答は出力減少、出力上昇ともに時間遅れが見られる。一次系圧力は負荷減少が生じた後、過渡的に 4.6 Kg/cm² 程上昇するが、負荷が増加に転じると急速に低下し、この後ほぼ設定値に整定していく。負荷変動 300sec 時点においても一次系圧力は若干低く、原子炉出力は定格値を上回っている。この状態では炉心出口付近で部分沸騰が生じており、圧力はまもなく設定値に至ると考えられる。後前進切換の場合においても自己加圧一体型炉では大きな微分反応度を持つ制御棒が、相当量挿入、引き抜きが行なわれている。

Fig 4.3.2 に見られるように蒸気流量の変化は半一体型炉のオーバーシュートが顕著である。これは、負荷の急速な減少により上昇した主蒸気圧力が低下しない間に、蒸気流量制御弁が急速に開となるため生じている。このような大量の蒸気が実際に流入すると、主機タービンはオーバースピードもしくはオーバートルクで異常停止し、操船上不具合を生じる。現実の主機タービンシステムでは、

プロペラ軸の回転数あるいは出力が定格をこえないような操縦弁制御が施される。蒸気発生器の水位は負荷変動終了後ほぼ設定水位付近にあり各パラメータの定格値との偏差は小さい。一体型炉では負荷減少時には蒸気ダンプ弁が動き、負荷の急速な減少を緩和している。急速出力減少に比べれば、負荷の減少率は小さいので主蒸気圧力は約 8 Kg/cm^2 程度に収まる。自己加圧一体型炉の蒸気流量の変化は一体型炉とよく似ている。主蒸気圧力の上昇は約 4.2 Kg/cm^2 程度に収まっている。

半一体型炉については、蒸気ダンプ弁不作動の場合の後前進切換についても解析を行なっている。蒸気ダンプ弁の不作動の影響は蒸気発生器水位の低下及び給水流量の初期の低下に現われるが、他のパラメータについては作動の場合に比較して、一次冷却材平均温度、加圧器圧力、加圧器水位、蒸気発生器圧力の上昇がわずかに大きくなる程度である。

Table 4.3.1 に示すように半一体型炉の各パラメータの変動は他の2炉型に比べて大きくない。蒸気流量のオーバーシュートのみが顕著である。一体型炉では原子炉出力、給水流量の最大値が大きい。一次冷却材平均温度の最大値、加圧器水位の最大値が半一体型炉よりも大きい。自己加圧一体型炉では原子炉出力のオーバーシュートは2%程度だが、制御棒の移動はこの負荷変動においてもかなり大きい。

4.4 出力上昇

Fig 4.4.1, Fig 4.4.2 に出力上昇時の半一体型炉の原子炉出力、一次冷却材平均温度を示す。Fig 4.4.3, Fig 4.4.4 に出力上昇時の一体型炉の原子炉出力、一次冷却材平均温度を示す。Fig 4.4.5, Fig 4.4.6 に出力上昇時の自己加圧一体型炉の原子炉出力、原子炉圧力を示す。また、過渡変化中の各パラメータの変動幅をTable 4.4.1 に示す。

Fig 4.4.1 に見られるように、半一体型炉の原子炉出力は要求された負荷に追従している。緩やかな負荷上昇に伴い Fig 4.4.2 に示す一次冷却材平均温度は緩やかに低下している。このような緩やかな負荷変動に対する制御棒駆動信号においては一次冷却材平均温度信号が支配的である。制御棒の駆動は一次冷却材温度の低下が不感帯 ($\pm 0.9^\circ\text{C}$) を超えるると行なわれ、不感帯内にはいると停止する。この繰り返しにより原子炉出力と一次冷却材平均温度は図のように変化する。Table 4.4.1 に示される一次冷却材平均温度の最小値は 0.8°C となっており不感帯より少し小さい。これは、制御棒駆動信号には出力不一致信号が加算されるためである。

半一体型炉においては、一次冷却材温度は最大でも 1.3°C 低下するのみで不感帯 ($\pm 1.4^\circ\text{C}$) を過渡変化中一度も超えない。原子炉出力の過渡変化後半での振動は、一次冷却材平均温度の偏差が不感帯に接近しているときに、蒸気流量がわずかに振動しているために制御棒が断続的に駆動させて生じている。蒸気流量の振動は主蒸気系の解析モデル上の不具合と考えられる。蒸気流量の振動がなければ制御棒の引き抜きは半一体型炉と同様にもう少し規則的になると考えられる。90sec以降のような緩やかな過渡変化に対しては一体型炉においても一次冷却材平均温度信号が支配的である。

自己加圧一体型炉においては90sec以降の緩やかな負荷上昇の解析は60secのみ行なわれ、この間各パラメータに大きな変動がなかったことから、原子炉は問題なく負荷に追従するものと判断して計算を打ち切っている。

Table 4.4.1 に示すように各種パラメータのいずれも設定値から大きく外れることなく、原子炉出力は負荷に追従した。この解析においては、通常操船において予想されるのであろうことが確認された。

4.5 出力減少

出力減少時の原子炉出力の応答を Fig 4.5.1 に、蒸気流量の変化を Fig 4.5.2 に、3 炉型比較して示す。Fig 4.5.1 中の点線は要求された蒸気流量を示している。Fig 4.5.2, Fig 4.5.4 には半一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、蒸気発生器水位を示す。Fig 4.5.5, Fig 4.5.6 には一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、主蒸気圧力を示す。Fig 4.5.7, Fig 4.5.8 には自己加圧一体型炉の制御パラメータのうち原子炉圧力、主蒸気圧力を示す。また、過渡変化中の各パラメータの変動幅を Table 4.5.1 に示す。

半一体型炉の原子炉出力の変化は急速出力減少の場合とほぼ変わらない。制御棒は初期、一次冷却材平均温度の上昇と出力不一致信号により急速に挿入された後、一旦引き抜かれるが一次冷却材平均温度信号により再び挿入される。制御棒の最大挿入量は急速出力減少の場合に比べて大きい。原子炉出力は 300sec 以降最小値で 6.8% まで低下するがその後目標値に至る。蒸気ダンプ弁は Fig 4.5.2 に見られるように一度だけ作動する。一次冷却材平均温度及び蒸気発生器水位の変動は急速出力減少に比べて小さい。

一体型炉の原子炉出力は急速に減少して最小値では 3% まで低下する。原子炉出力の最小値は急速出力減少の場合よりも大きく、原子炉出力の低下は急速出力減少の場合よりも速やかである。制御棒の最大挿入量も急速出力減少の場合よりも大きい。出力不一致信号には蒸気ダンプ流量を含めた蒸気流量を用いているので蒸気ダンプ弁が作動した場合、出力不一致信号は小さくなる。この負荷変動時には Fig 4.5.3 に見られるように蒸気ダンプ弁は作動しない。給水減少率可変リミッタはこの程度の負荷変動では顕著な効果を示していない。一次冷却材平均温度及び主蒸気圧力の変動は急速出力減少の場合に比べて小さい。

自己加圧一体型炉の原子炉出力の変化は急速出力減少の場合とほぼ同じである。制御棒は急速出力減少の場合と同じく完全挿入される。Fig 4.5.2 に見られるように蒸気ダンプ弁は作動しない。一次系圧力の上昇、主蒸気圧力の上昇は急速出力減少の場合に比べて小さい。この負荷変動の場合にも、蒸気ドーム部は断熱圧縮されるため一次系圧力の低下は遅れる。原子炉出力は一次系圧力が高いために抑制され最小値で 7.5% まで低下し、目標値に整定しない。原子炉出口温度は計算終了時点においても低下を続けている。

Table 4.5.1 に示す各パラメータの 3 炉型間の傾向は急速出力上昇の場合とほぼ同じで、半一体型炉では加圧器圧力の上昇、一次冷却材平均温度の上昇、加圧器水位の変動が大きい。一体型炉では原子炉出力の最小値が他に比べて小さく、このアンダーシュートの影響で一次冷却材平均温度の低下が大きい。自己加圧一体型炉では炉心出口温度の低下が大きく、制御棒移動距離が際だって大きい。しかし、いずれのパラメータの変動も急速出力減少の場合の変動以下である。

4.6 急速前後進切換

急速前後進切換時の原子炉出力の応答を Fig 4.6.1 に、蒸気流量の変化を Fig 4.6.2 に、3 炉比較して示す。Fig 4.6.1 中の点線は要求された蒸気流量を示している。Fig 4.6.2, Fig 4.6.4 には半一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、蒸気発生器水位を示す。Fig 4.6.5, Fig 4.6.6 には一体型炉の制御対照パラメータのうち一次冷却材平均温度、主蒸気圧力を示す。

Fig 4.6.7, Fig 4.6.8には自己加圧一体型炉の制御パラメータのうち原子炉圧力, 主蒸気圧力を示す。また, 過渡変化中の各パラメータの変動幅をTable 4.6.1に示す。

急速前後進切換では, Fig 4.6.1の点線で示されるような負荷変動が要求される。原子炉出力の応答は3炉型間において異なっている。

半一体型炉では, 負荷減少に伴い, 制御棒が急速に挿入され, 一次冷却材平均温度も上昇する。その後の負荷増加により制御棒の引き抜き及び一次冷却材平均温度上昇の抑制が起こり, 原子炉出力は上昇してゆく。原子炉出力の応答は負荷の変動に比較して緩やかで, 最小値でも約70%までしか低下しない。蒸気流量 (Fig 4.6.2) はほぼ要求通りに変化している。一次冷却材平均温度の変動 (Fig 4.6.3), 蒸気発生器水位の変動 (Fig 4.6.4) も小さい。半一体型炉にとって, 急速前後進切換はあまり厳しい負荷変動条件ではない。

一体型炉では, 原子炉出力は負荷の変化に若干遅れるものの要求された負荷変動通りに追従している。原子炉出力は約45%出力から上昇を始め8%ほどオーバーシュートしたの値整定に向かう。この負荷変動においてはオーバーシュートが自己加圧一体型炉により小さい。蒸気流量はほぼ要求通りに変化している。一次冷却材平均温度の変動 (Fig 4.6.5), 主蒸気圧力の変動 (Fig 4.6.6) は小さい。一体型炉は急速負荷変動に忠実に追従した。

自己加圧一体型炉の原子炉出力は負荷30secから減少から増加に向かうにもかかわらず, 減少を続け約32%まで低下する。このアンダーシュートに負荷の減少に伴う原子炉圧力の上昇と一次冷却材の温度の低下によるが, おもに原子炉圧力が高いことにより制御棒が40sec過ぎまで挿入され続けることによる。制御棒は最大で46cm挿入されている。この後, 原子炉出力は上昇に転じ蒸気流量の振動により一旦低下傾向を見せるものの再び上昇して最大10%程度オーバーシュートする。蒸気流量 (Fig 4.6.2) の変化では自己加圧一体型炉の他の解析ケースでは見られなかった振動が生じている。この負荷変動条件では, 原子炉圧力の変動 (Fig 4.6.7) の時間的な遅れにより, 負荷の変動を増幅して一次系に伝えている。主蒸気圧力の変動 (Fig 4.6.8) は小さい。

Table 4.6.1に見られるように半一体型炉の諸パラメータの変動は他の解析ケースに比べて小さく, 原子炉出力の変動が他の炉型に比べて小さい。一体型炉の諸パラメータもあまり変動していない。原子炉出力の変動は比較的小さい。自己加圧一体型炉の諸パラメータの中では原子炉出口温度の低下が大きい。また, 原子炉出力のアンダーシュート, オーバーシュートがいずれも大きく, 時間遅れが顕著である。制御棒の移動距離は他の解析ケース同様かなり大きい。

Table 4. 1. 1 急速出力上昇時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型炉		自己加圧一体型炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	90.4	10.0	103.0	10.0	96.0	10.0
加圧器 (一次系) 圧力 kg/cm ²	+4.4	-2.6	+0.0	-2.2	+0.0	-1.2
一次冷却材平均温度 (°C)	+0.0	-4.6	+0.0	-1.5	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	+0.0	-0.5
制御棒移動 (cm) *	+35.4	-0.0	+25.2	-0.0	+21.0	-0.0
加圧器水位 (%)	+20.0	-34.0	+0.0	-4.1	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+0.0	-13.0
蒸気発生器水位 (%)	80.0	26.0	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	63.3	39.4	42.1	40.9	45.4	44.0
給水流量 (%)	95.0	10.0	109.1	10.0	99.0	10.0
蒸気流量 (%)	111.0	10.0	91.2	10.0	91.0	10.0

*; + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

Table 4.2.1 急速出力減少時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型 炉		自己加圧一体型 炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	100.0	7.1	100.0	2.0	100.0	8.2
加圧器 (一次系) 圧力 kg/cm ²	+6.2	-4.6	+5.8	-6.1	+5.9	-0.0
一次冷却材平均温度 (°C)	+9.4	-0.0	+7.5	-0.6	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	+0.0	-12.5
制御棒移動 (cm) *	+0.0	-36.8	+0.0	-26.4	+0.0	-81.5
加圧器水位 (%)	+13.2	-0.0	+19.2	-0.0	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+7.2	-0.0
蒸気発生器水位 (%)	73.3	14.6	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	70.2	39.0	55.1	39.7	49.6	44.1
給水流量 (%)	100.0	4.1	100.0	9.6	100.0	5.0
蒸気流量 (%)	100.0	10.0	100.0	9.6	100.0	10.0

*; + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

Table 4.3.1 後前進切換時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型炉		自己加圧一体型炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	99.7	32.4	110.0	11.0	102.0	10.0
加圧器(一次系)圧力 kg/cm ²	+4.8	-3.5	+3.9	-6.5	+4.6	-1.5
一次冷却材平均温度 (°C)	+3.4	-3.3	+4.9	-0.8	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	+0.0	-6.9
制御棒移動 (cm) *	+14.7	-35.6	+25.7	-19.5	+25.0	-43.0
加圧器水位 (%)	+3.7	-4.5	+11.7	-0.6	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+5.0	-8.0
蒸気発生器水位 (%)	77.5	21.2	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	61.1	37.7	46.0	37.3	49.0	44.1
給水流量 (%)	99.0	39.0	115.6	9.6	110.0	5.1
蒸気流量 (%)	123.0	10.0	99.2	9.9	102.0	9.4

*; + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

Table 4.4.1 出力上昇時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型 炉		自己加圧一体型 炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	99.3	10.0	100.0	10.0	---	10.0
加圧器 (一次系) 圧力 kg/cm ²	+3.1	-0.9	+0.4	-1.2	---	-0.3
一次冷却材平均温度 (°C)	+1.3	-0.8	+0.1	-1.3	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	---	---
制御棒移動 (cm) *	+23.3	-0.0	+8.9	-0.0	---	-0.0
加圧器水位 (%)	+0.9	-1.7	+0.2	-4.1	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+0.0	---
蒸気発生器水位 (%)	61.8	40.6	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	63.3	38.7	41.2	40.9	---	---
給水流量 (%)	100.0	10.0	100.0	10.0	---	10.0
蒸気流量 (%)	99.0	10.0	100.0	10.0	---	10.0

*; + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

Table 4.5.1 出力減少時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型炉		自己加圧一体型炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	100.0	6.8	100.0	3.0	100.0	7.5
加圧器 (一次系) 圧力 kg/cm ²	+5.4	-4.2	+2.4	-5.3	+4.2	-0.0
一次冷却材平均温度 (°C)	+7.1	-0.0	+2.8	-4.1	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	+0.0	-9.3
制御棒移動 (cm) *	+0.0	-46.1	+0.0	-46.1	+0.0	-81.5
加圧器水位 (%)	+9.9	-0.0	+7.0	-8.8	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+5.0	-0.0
蒸気発生器水位 (%)	74.2	20.2	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	68.7	39.0	41.5	39.3	45.3	44.4
給水流量 (%)	100.0	4.0	100.0	9.6	100.0	6.9
蒸気流量 (%)	100.0	10.0	100.0	9.6	100.0	10.0

*; + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

Table 4.6.1 急速前進切替時の各パラメータ比較

パラメータ	半一体型炉		一体型 炉		自己加圧一体型炉	
	最大値	最小値	最大値	最小値	最大値	最小値
原子炉出力 (%)	100.0	69.9	100.0	45.0	100.0	32.0
加圧器 (一次系) 圧力 kg/cm ²	+3.9	-0.0	+1.7	-1.4	+1.8	-2.4
一次冷却材平均温度 (°C)	+1.8	-0.0	+1.5	-0.8	---	---
一次冷却材出口温度 (°C)	---	---	---	---	+0.0	-8.8
制御棒移動 (cm) *	+3.5	-26.3	+2.5	-22.8	+0.0	-46.0
加圧器水位 (%)	+1.6	-0.0	+3.7	-0.0	---	---
圧力容器水位 (cm)	---	---	---	---	+2.0	-4.0
蒸気発生器水位 (%)	59.9	36.2	---	---	---	---
蒸気発生器圧力 (kg/cm ² a)	48.6	39.0	41.8	39.5	45.4	44.0
給水流量 (%)	100.0	79.0	100.0	44.0	100.0	37.0
蒸気流量 (%)	100.0	41.0	100.0	44.4	100.0	38.0

* : + : 制御棒引抜、- : 制御棒挿入

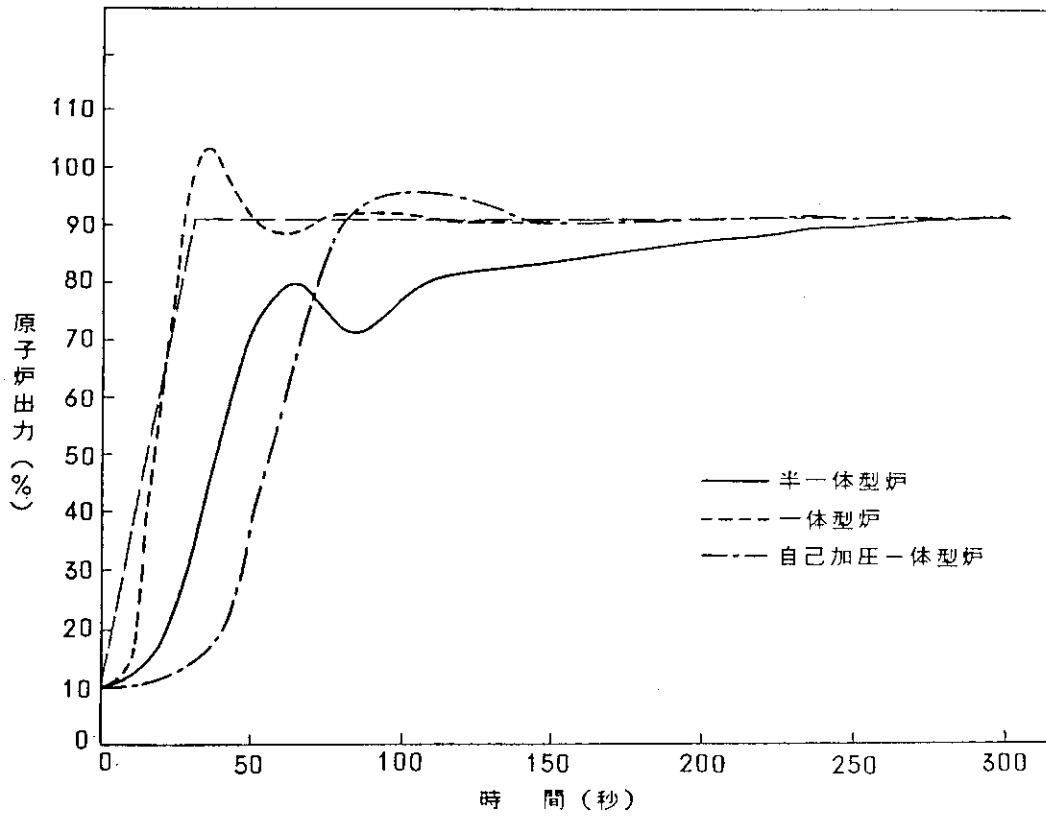


Fig 4.1.1 急速出力上昇時の原子炉出力 (3炉型)

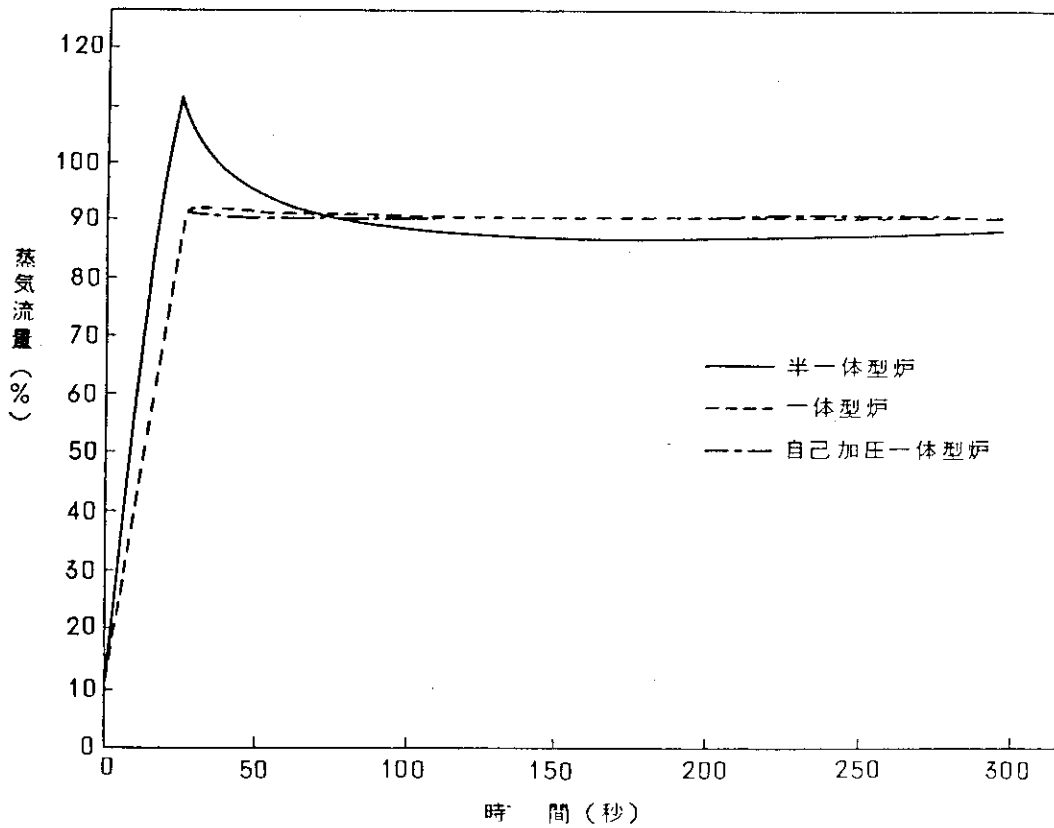


Fig 4.1.2 急速出力上昇時の蒸気流量 (3炉型)

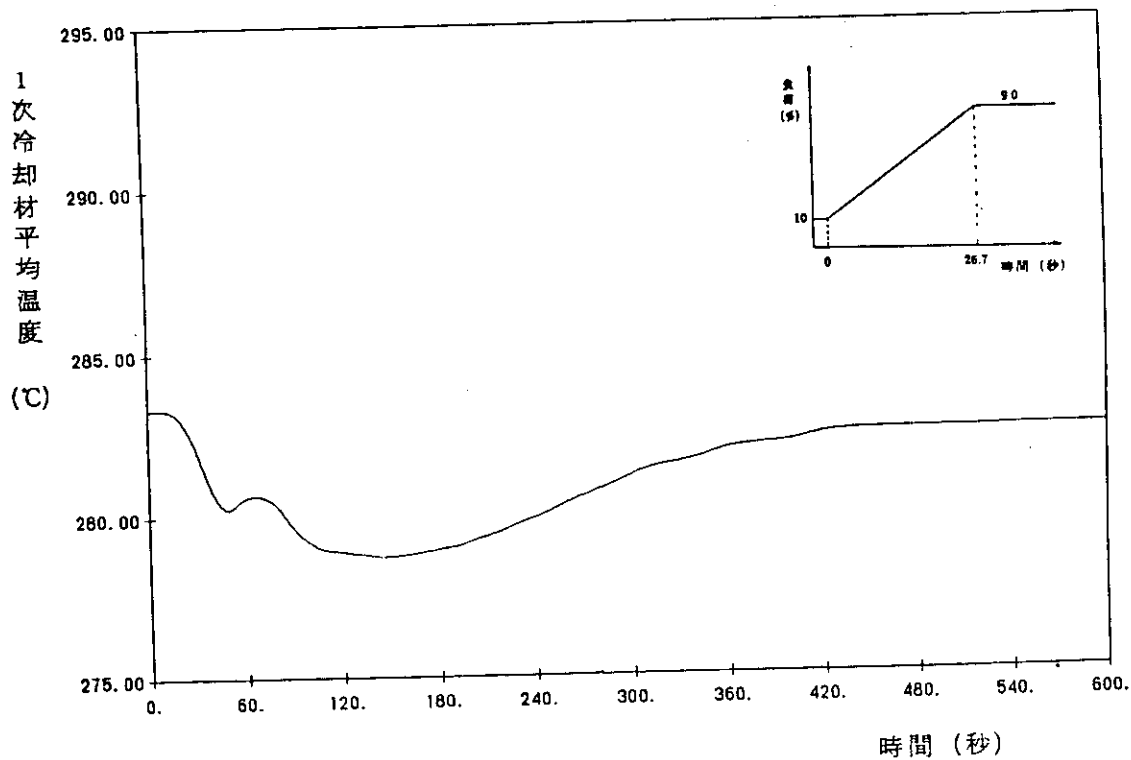


Fig 4.1.3 急速出力上昇時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

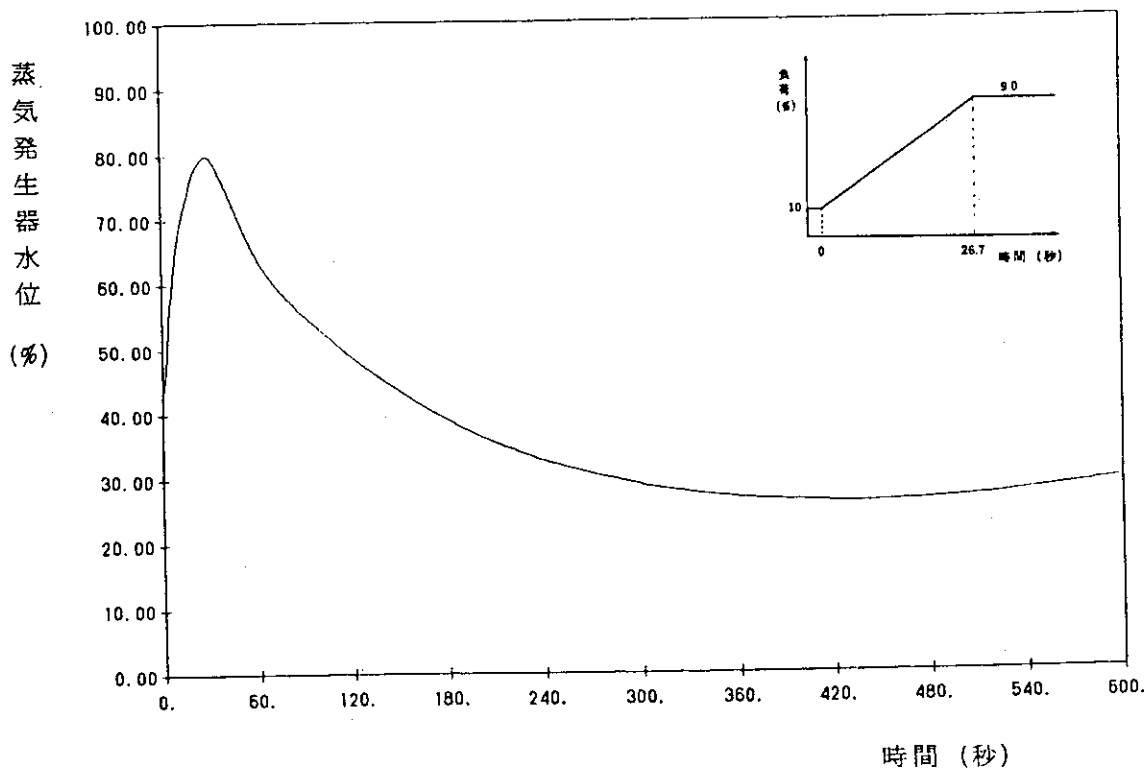


Fig 4.1.4 急速出力上昇時の蒸気発生器水位 (半一体型炉)

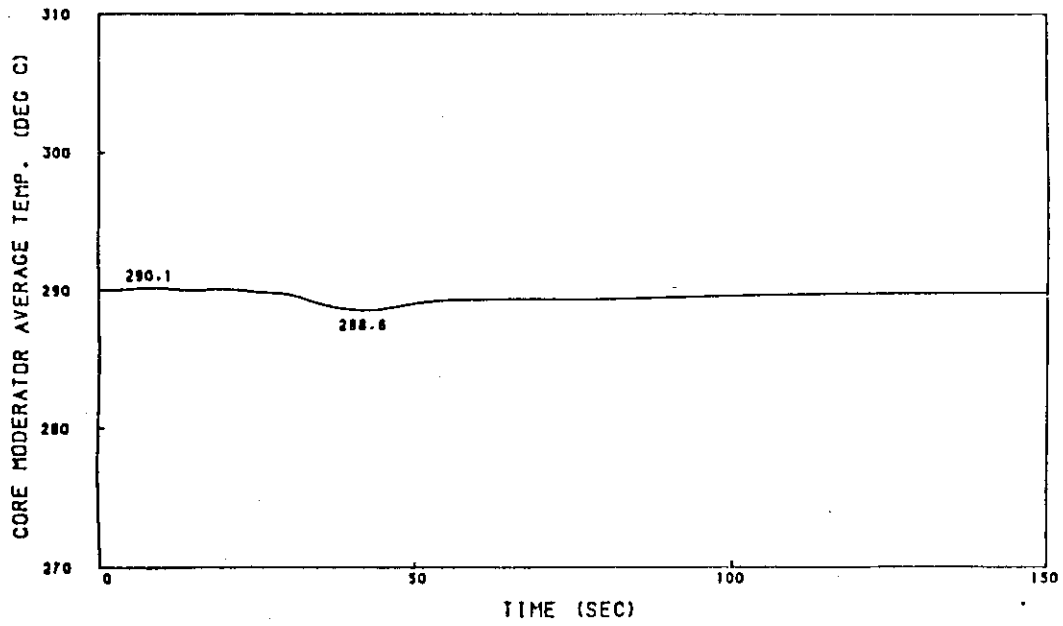


Fig 4.1.5 急速出力上昇時の一次冷却材炉心平均温度（一体型炉）

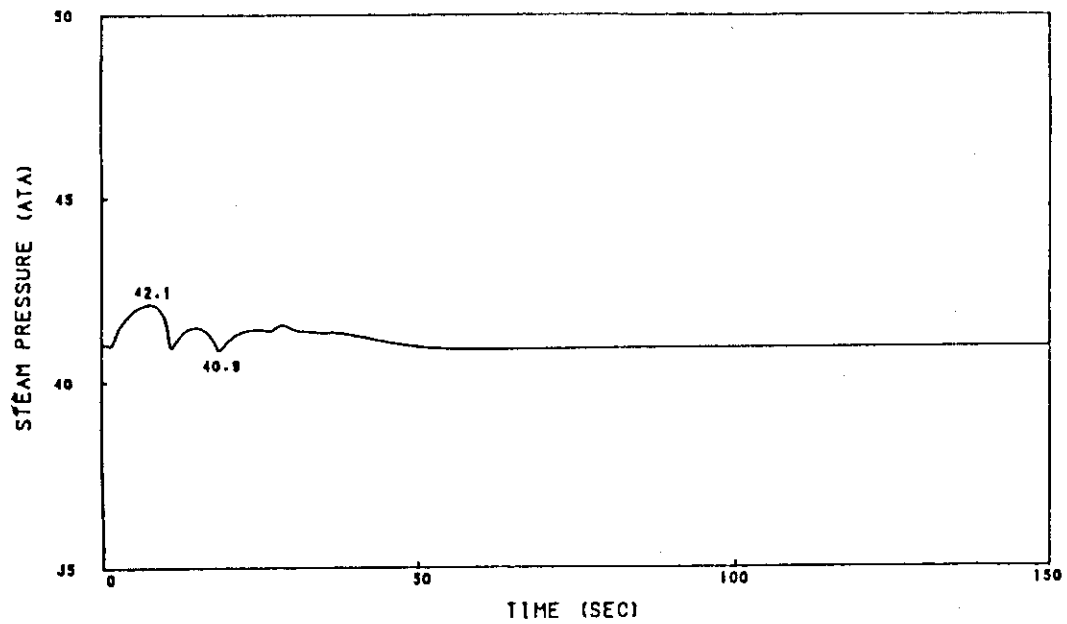


Fig 4.1.6 急速出力上昇時の主蒸気圧力（一体型炉）

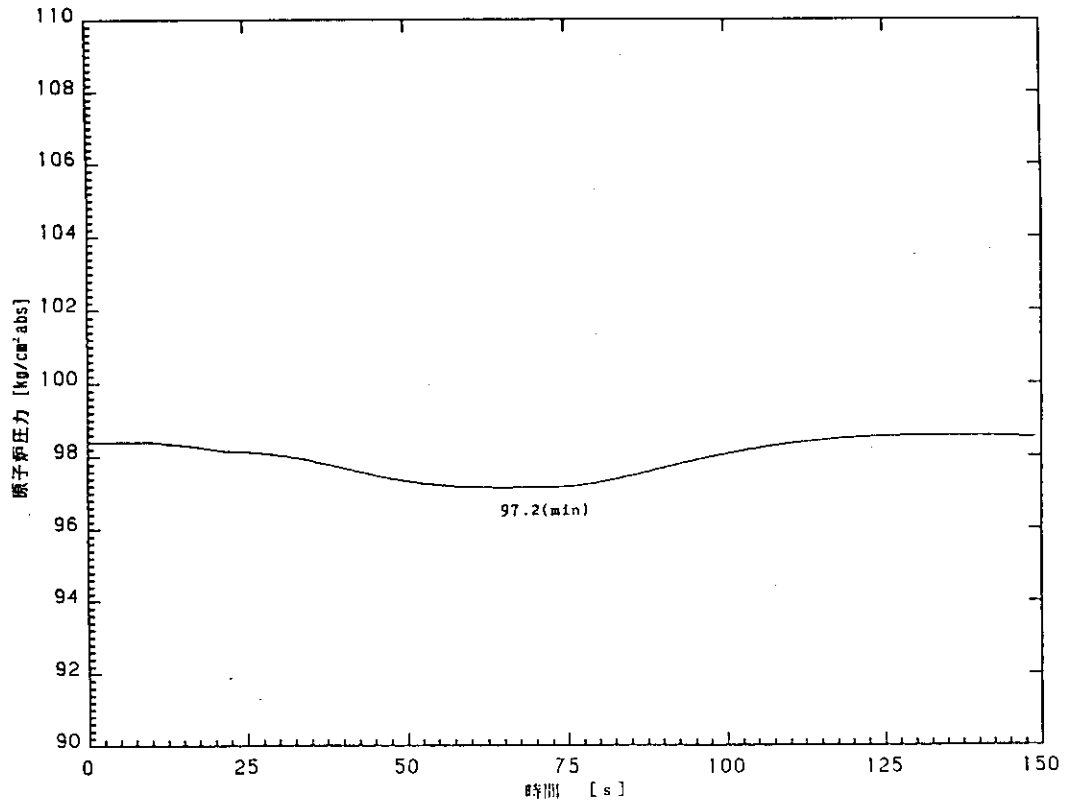


Fig 4.1.7 急速出力上昇時の原子炉圧力 (自己加圧一体型炉)

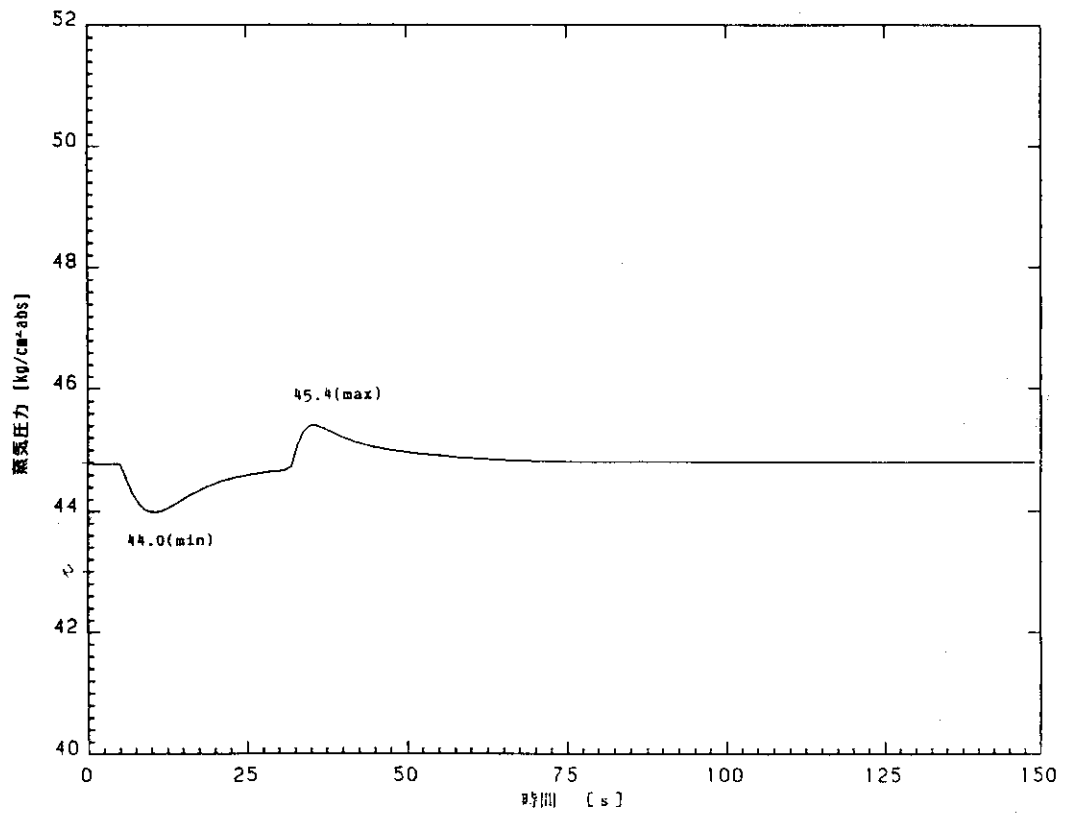


Fig 4.1.8 急速出力上昇時の主蒸気圧力 (自己加圧一体型炉)

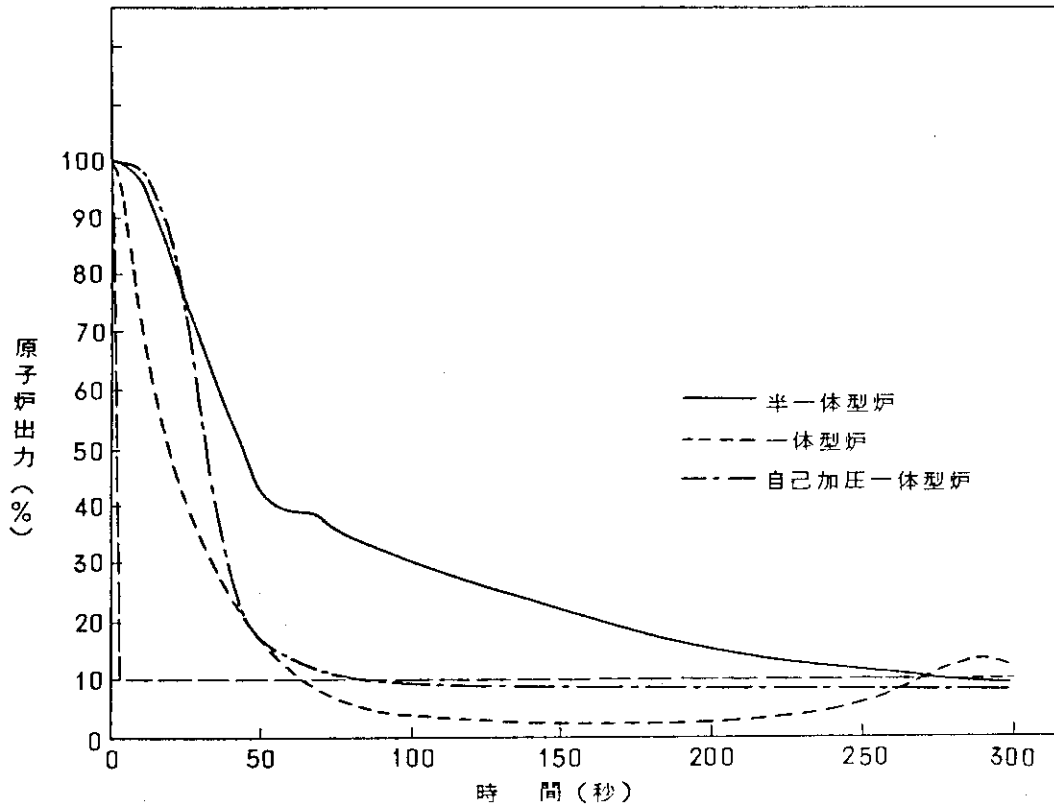


Fig 4.2.1 急速出力減少時の原子炉出力 (3炉型)

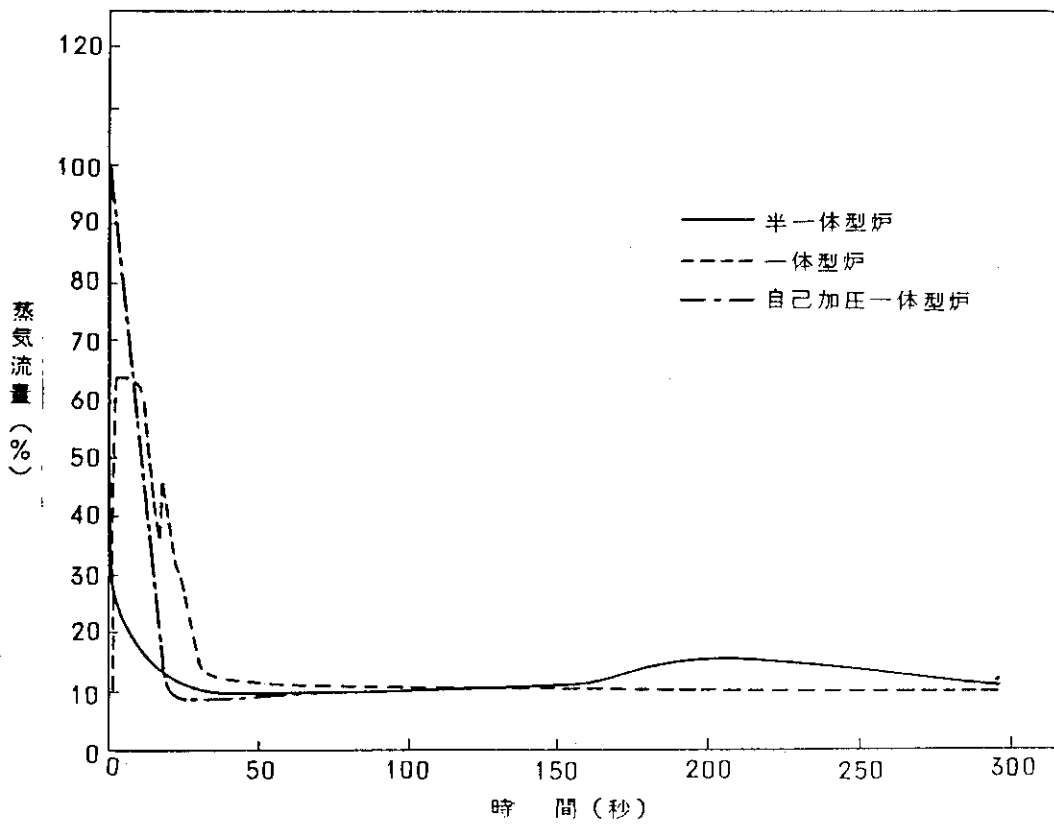


Fig 4.2.2 急速出力減少時の蒸気流量 (3炉型)

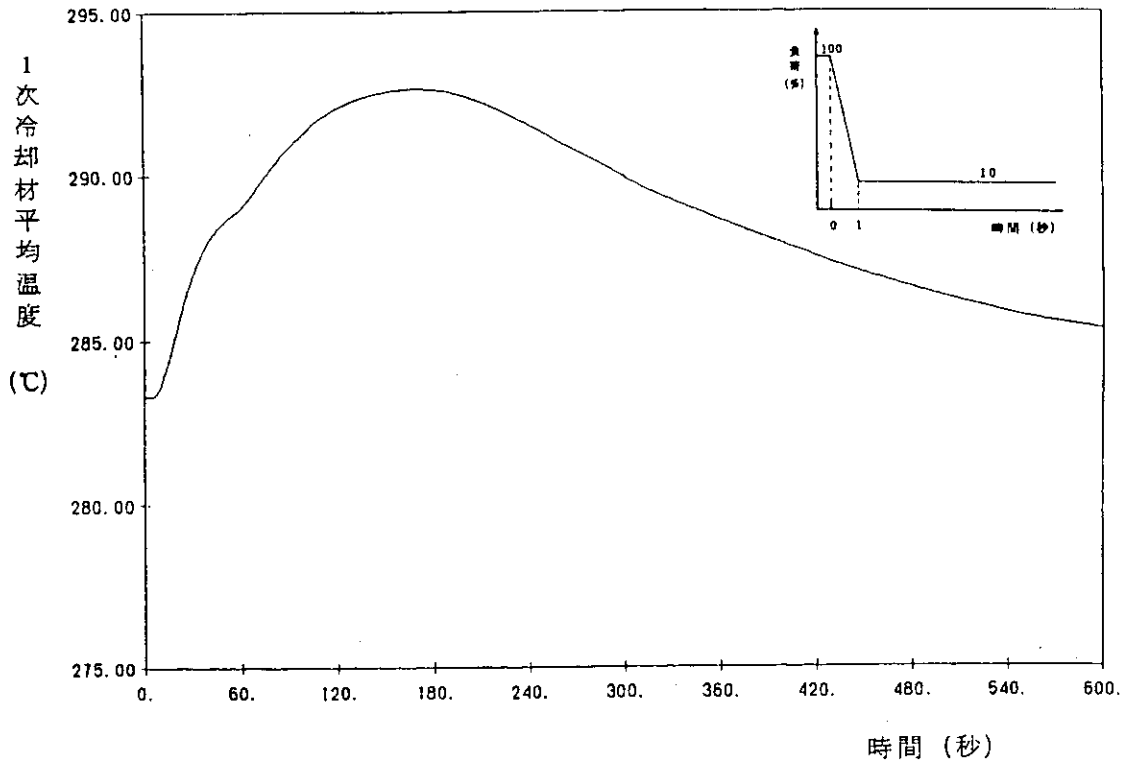


Fig 4.2.3 急速出力減少時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

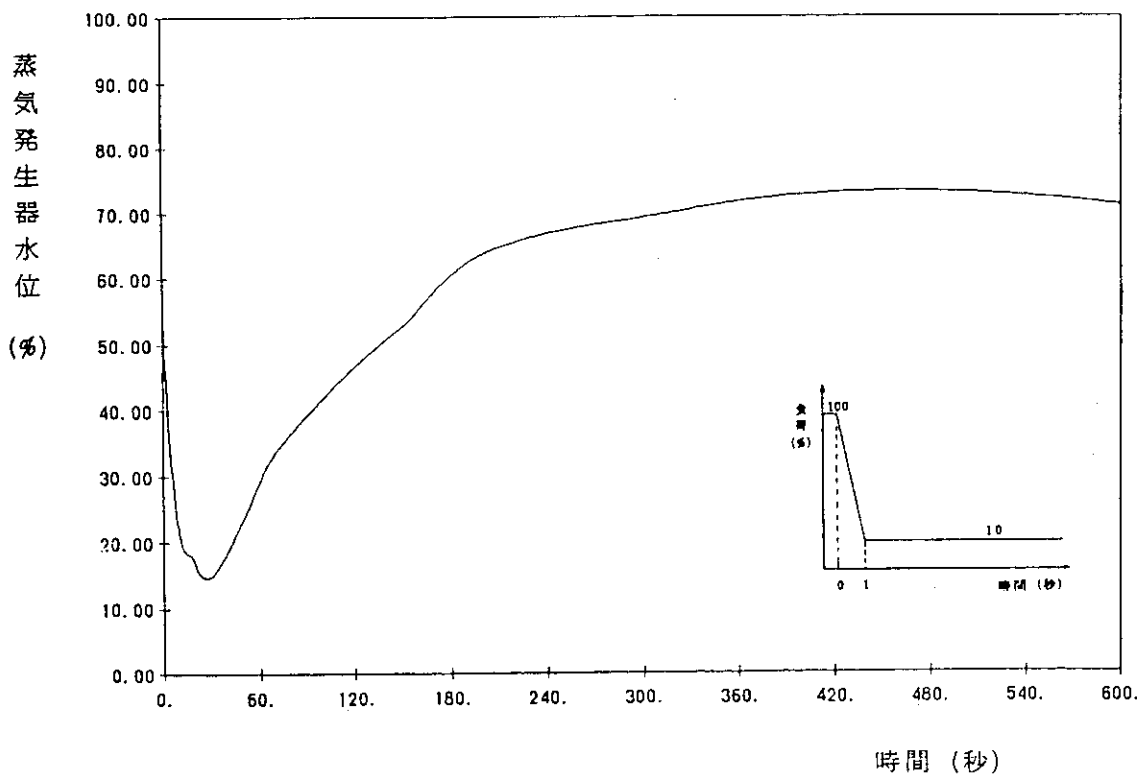


Fig 4.2.4 急速出力減少時の蒸気発生器水位 (半一体型炉)

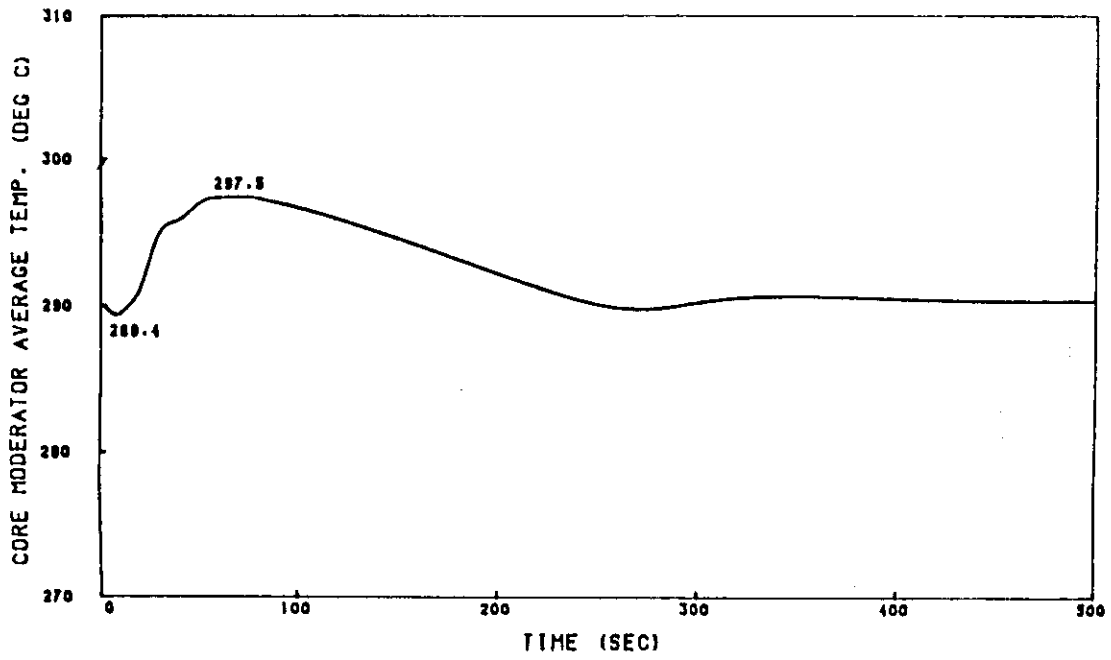


Fig 4.2.5 急速出力減少時の一次冷却材炉心平均温度 (一体型炉)

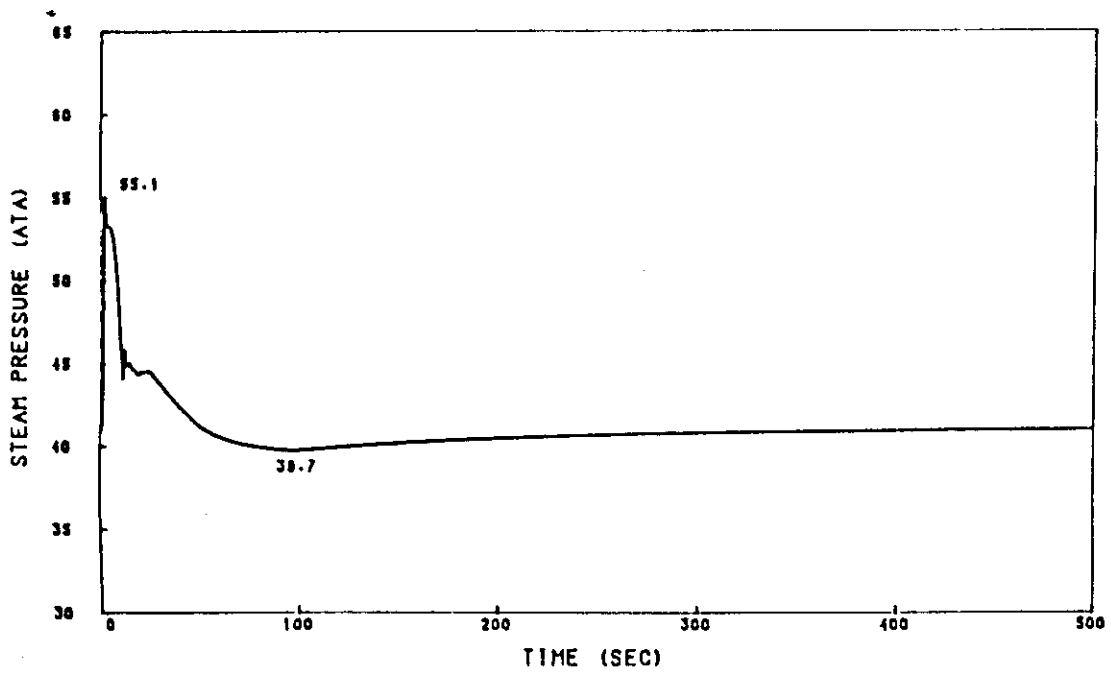


Fig 4.2.6 急速出力減少時の主蒸気圧力 (一体型炉)

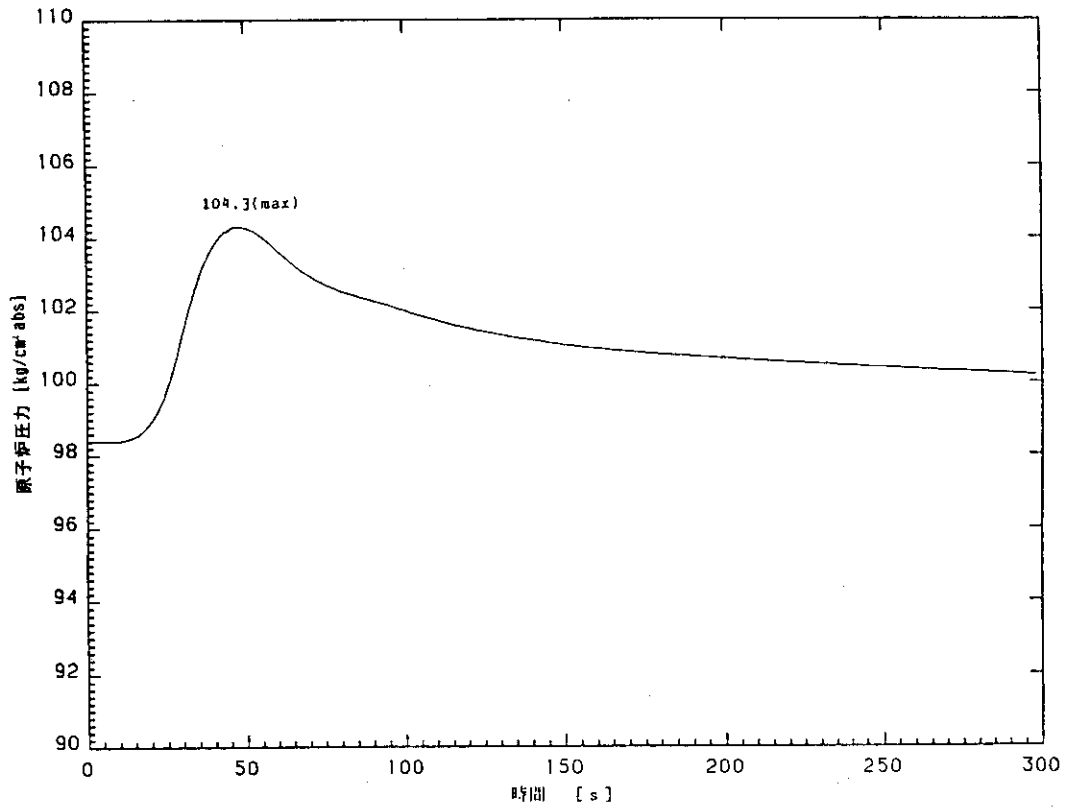


Fig 4.2.7 急速出力減少時の原子炉圧力 (自己加圧一体型炉)

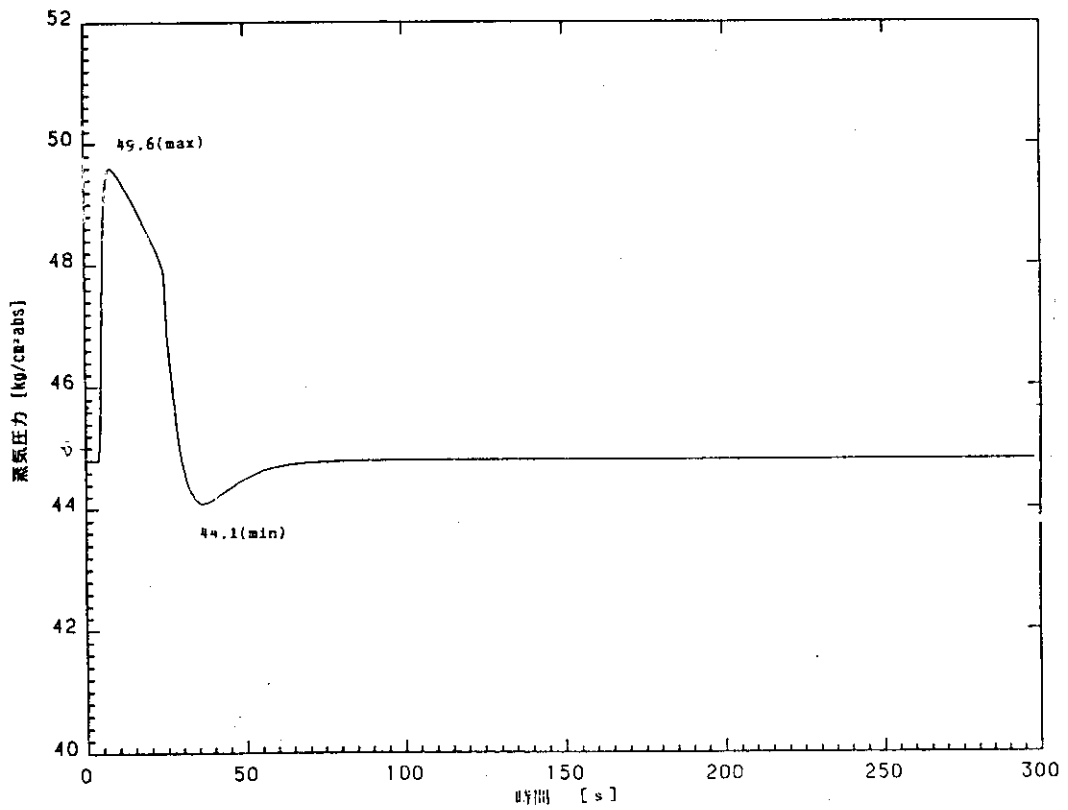


Fig 4.2.8 急速出力減少時の主蒸気圧力 (自己加圧一体型炉)

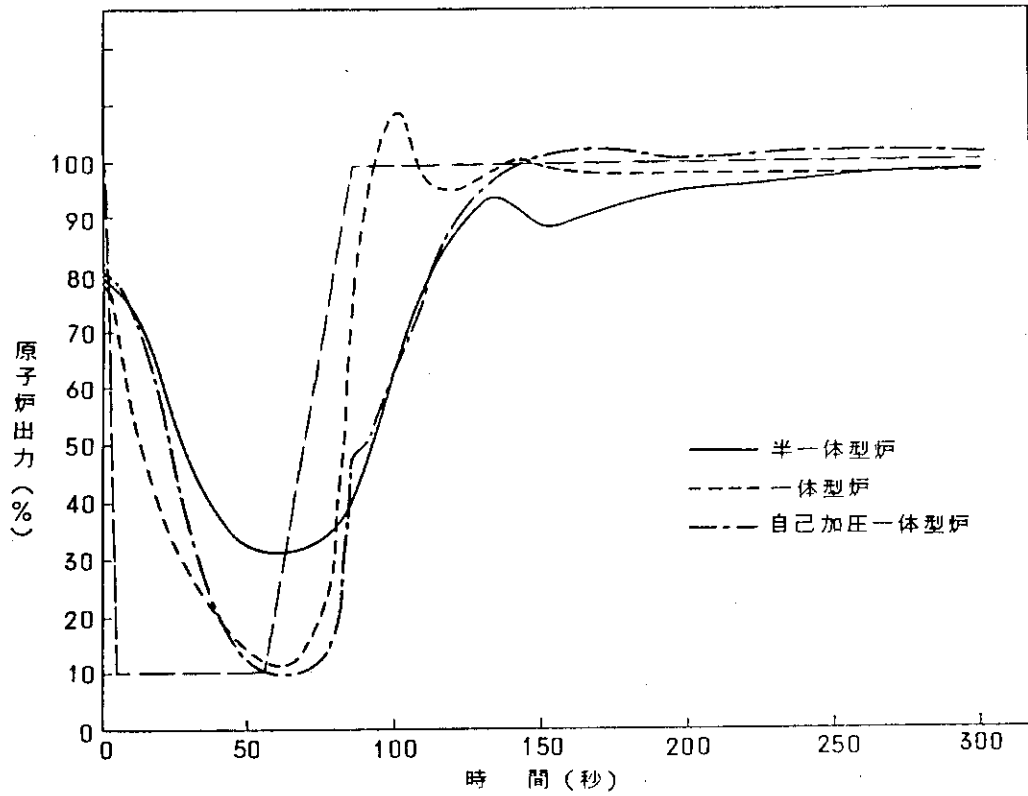


Fig 4.3.1 後前進切換時の原子炉出力 (3炉型)

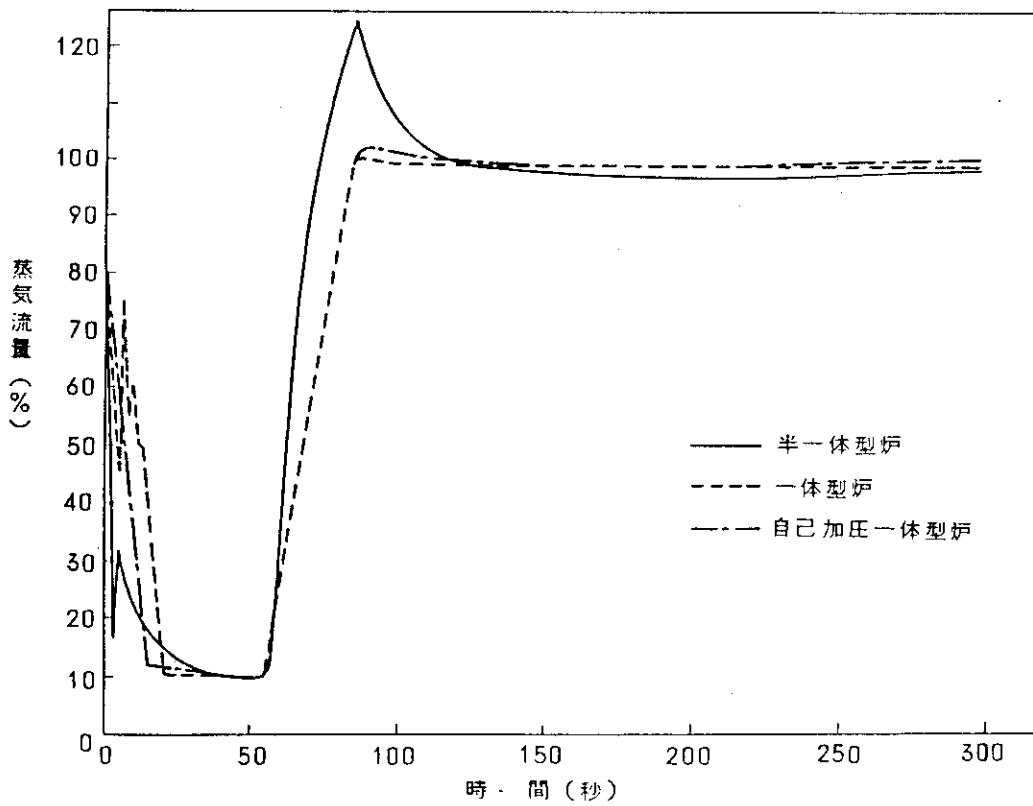


Fig 4.3.2 後前進切換時の蒸気流量 (3炉型)

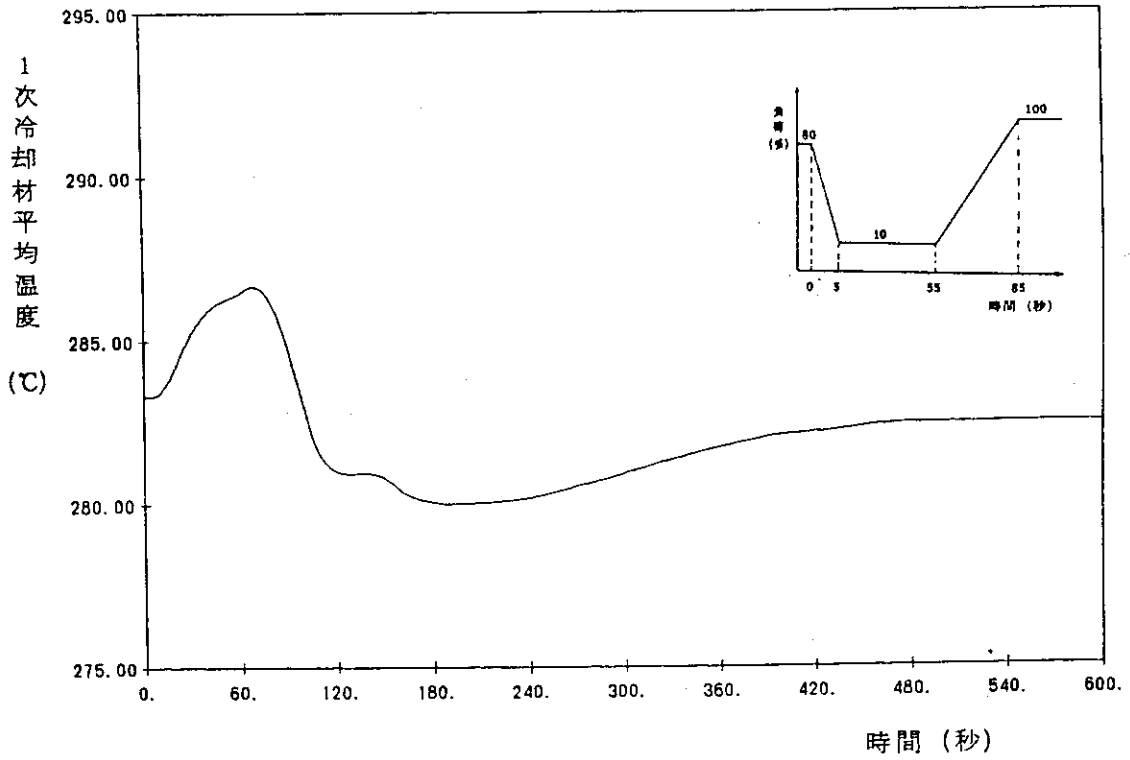


Fig 4.3.3 後前進切換時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

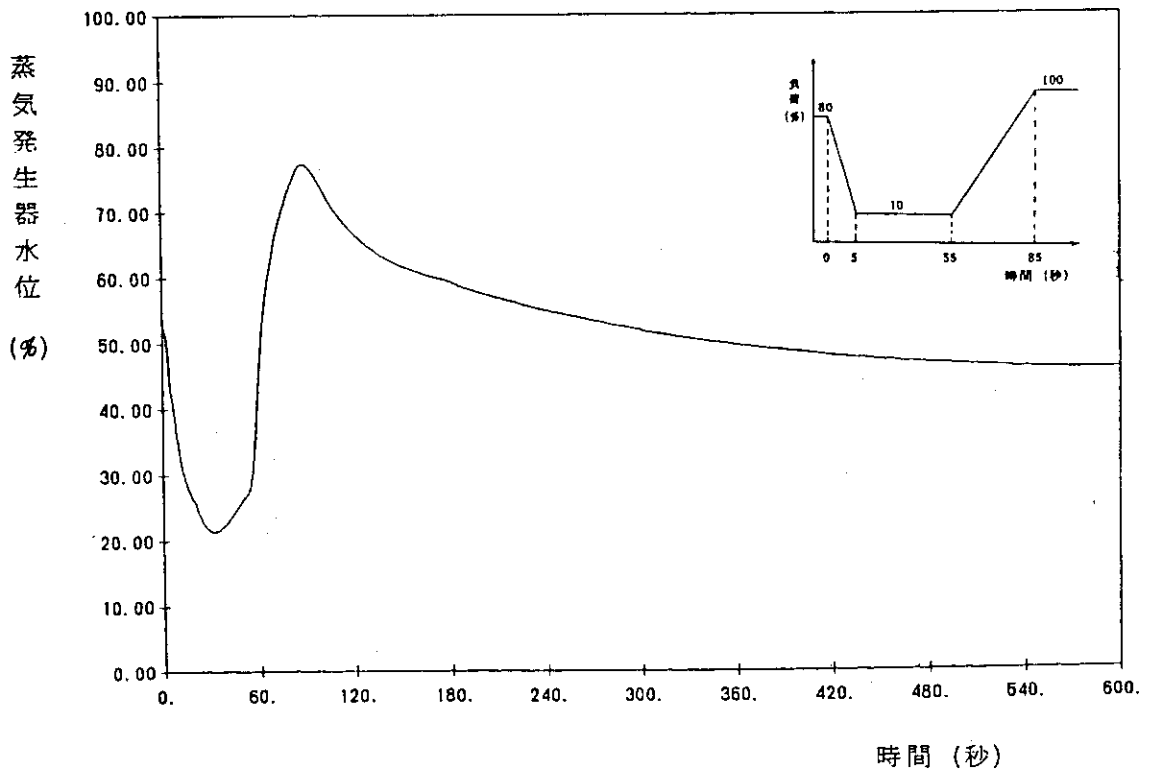


Fig 4.3.4 後前進切換時の蒸気発生器水位 (半一体型炉)

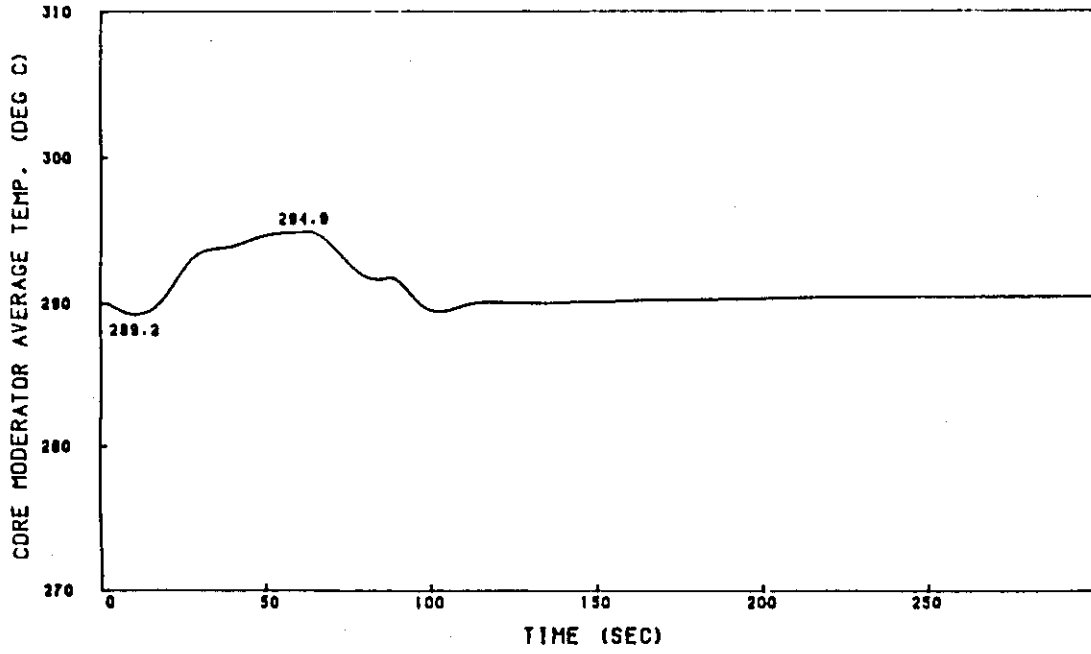


Fig 4.3.5 後前進切換時の一次冷却材炉心平均温度 (一体型炉)

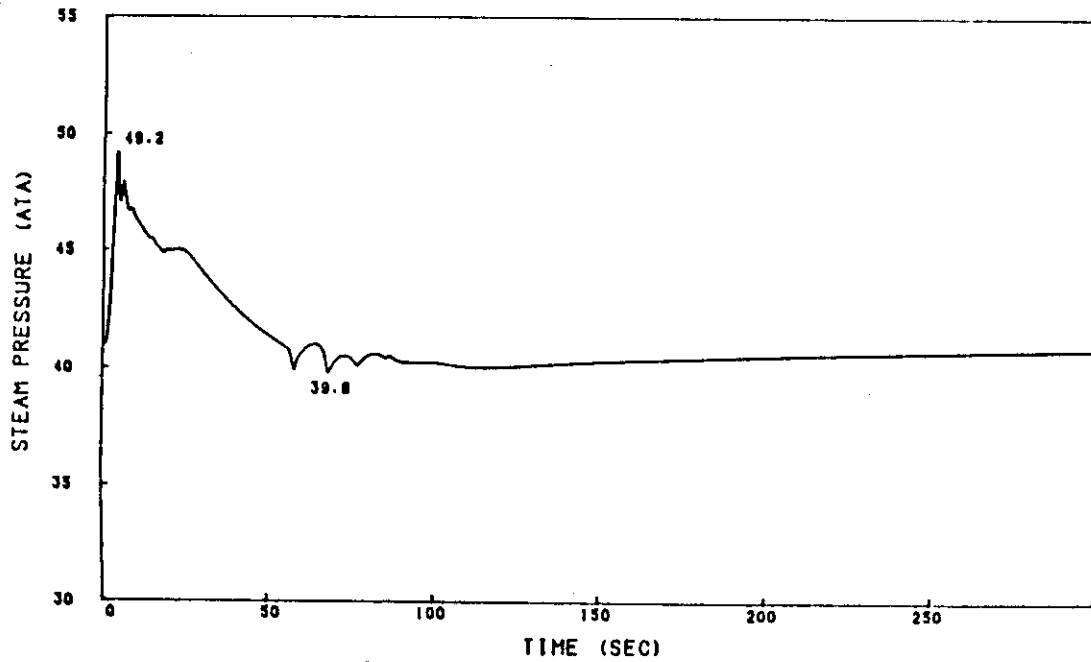


Fig 4.3.6 後前進切換時の主蒸気圧力

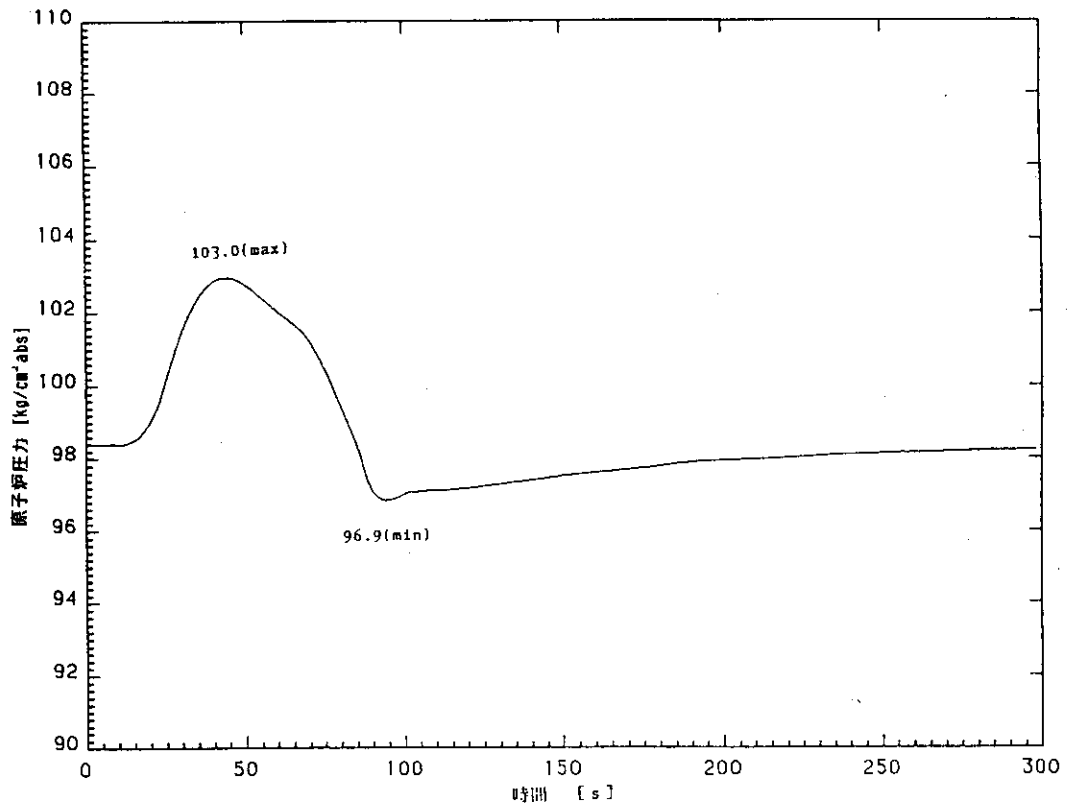


Fig 4.3.7 後前進切換時の原子炉圧力 (自己加圧一体型炉)

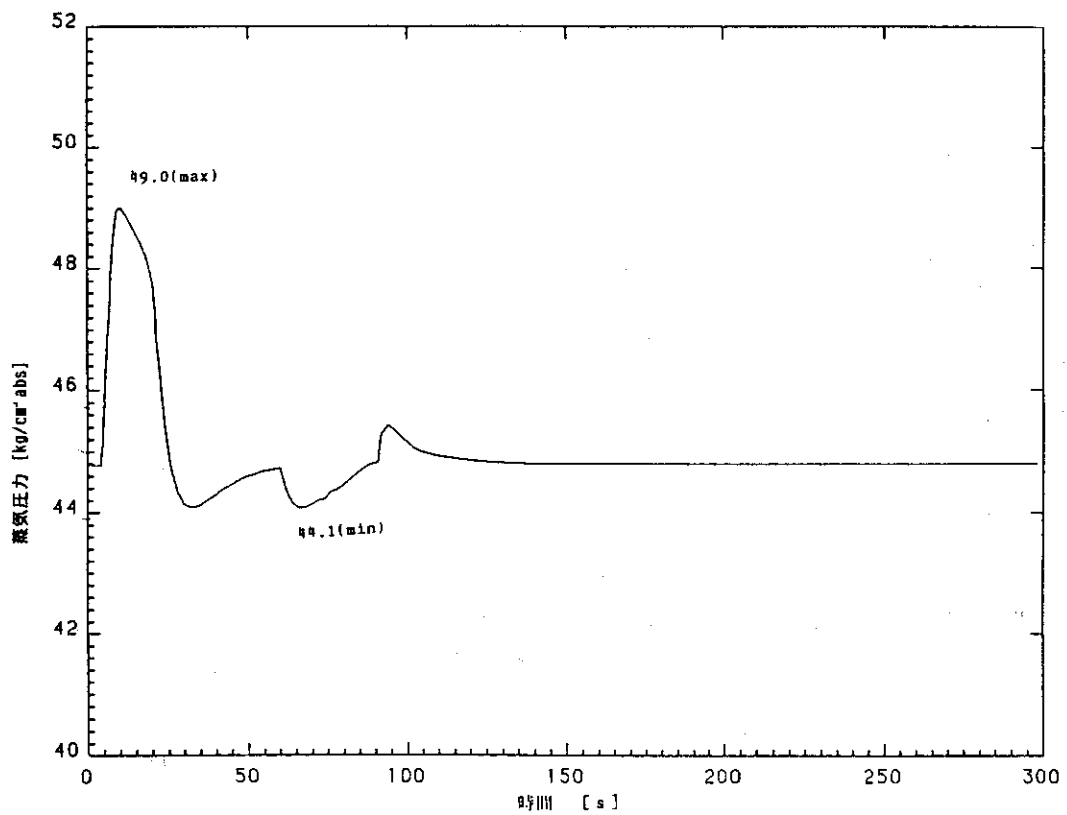


Fig 4.3.8 後前進切換時の主蒸気圧力 (自己加圧一体型炉)

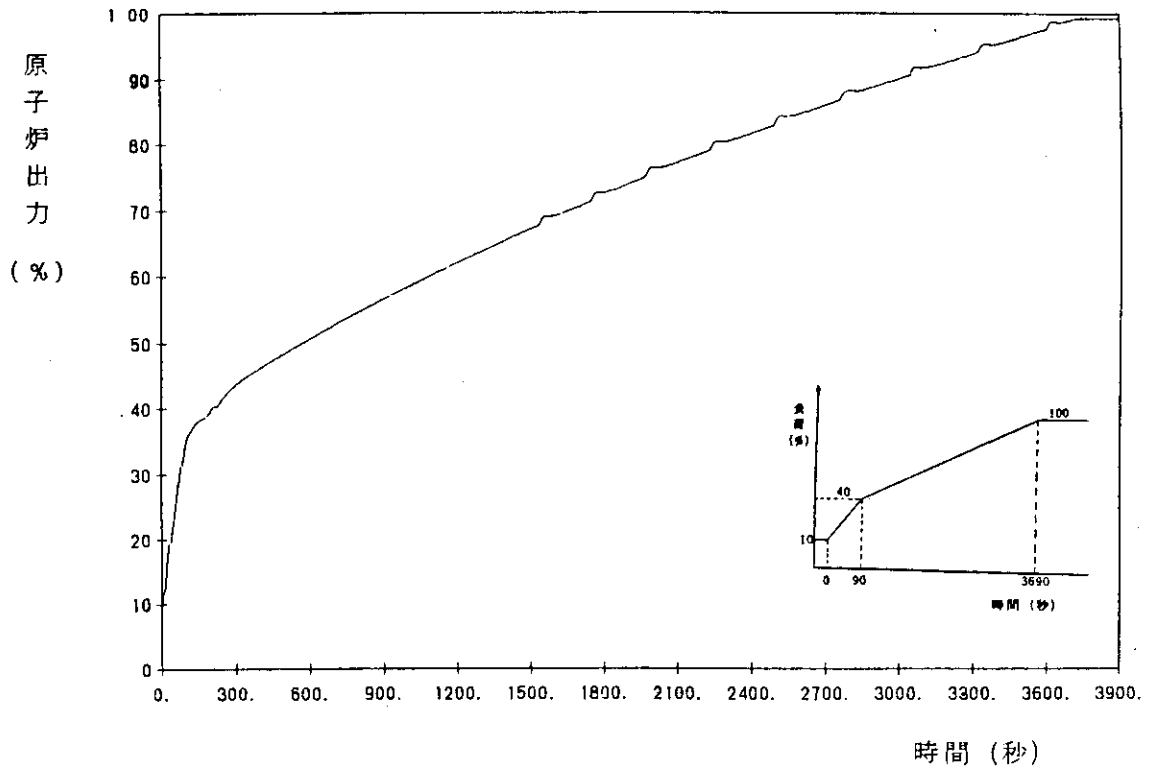


Fig 4.4.1 出力上昇時の原子炉出力 (半一体型炉)

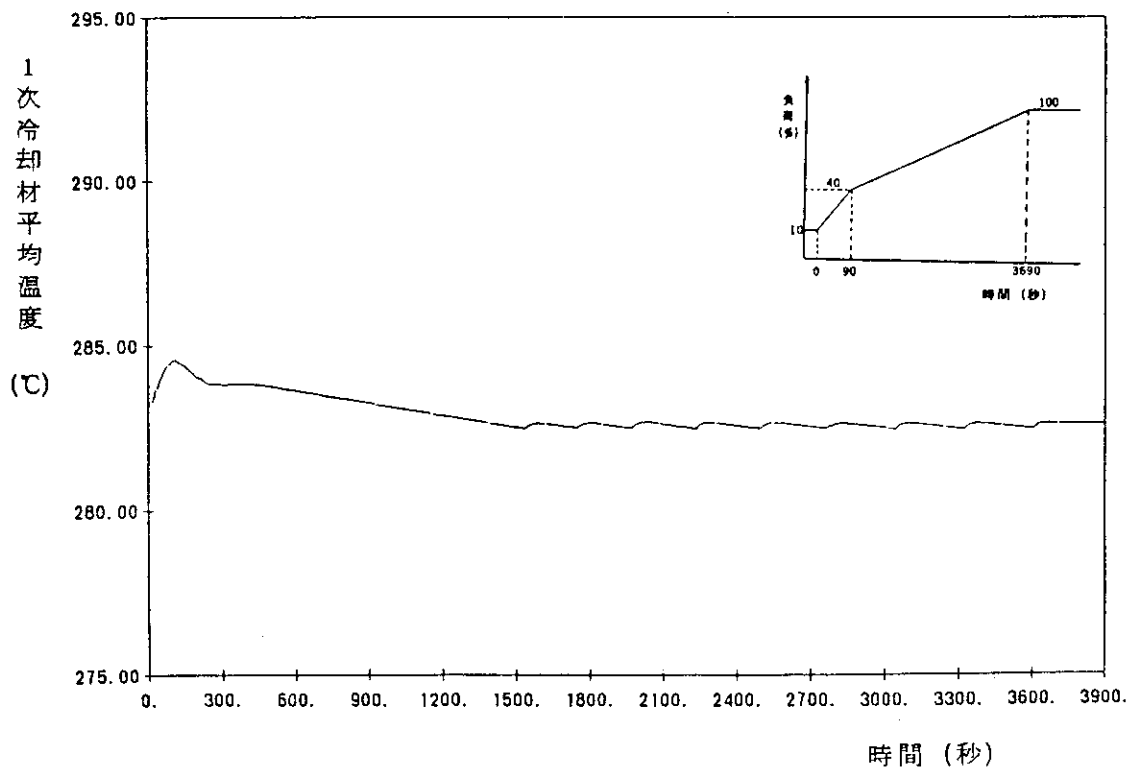


Fig 4.4.2 出力上昇時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

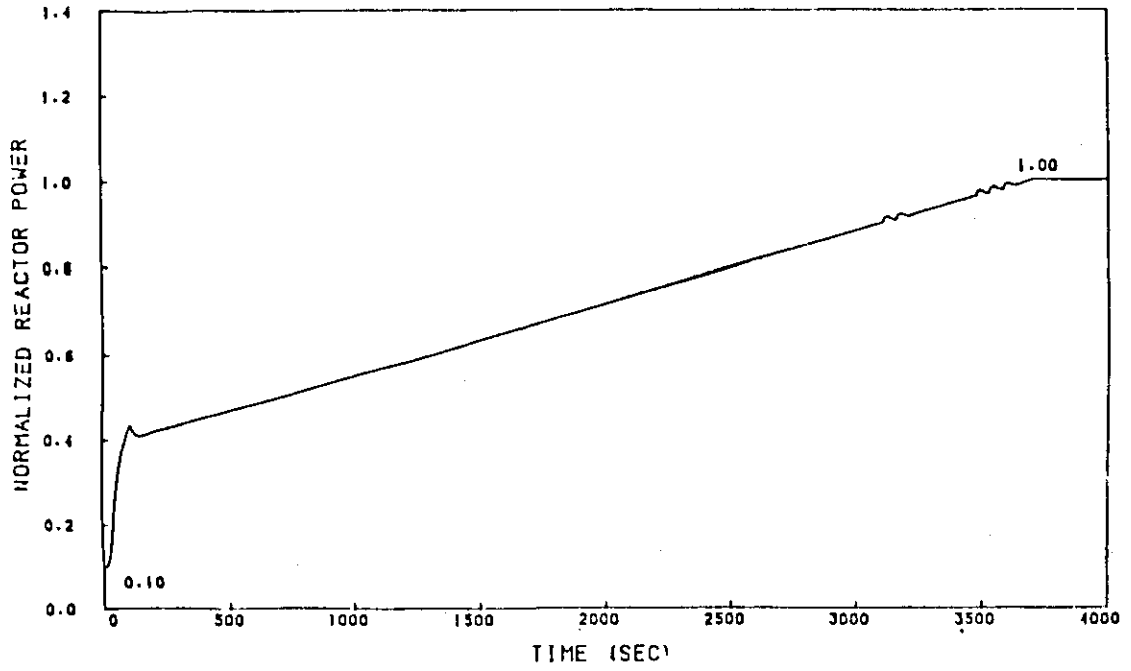


Fig 4.4.3 出力上昇時の原子力 (一体型炉)

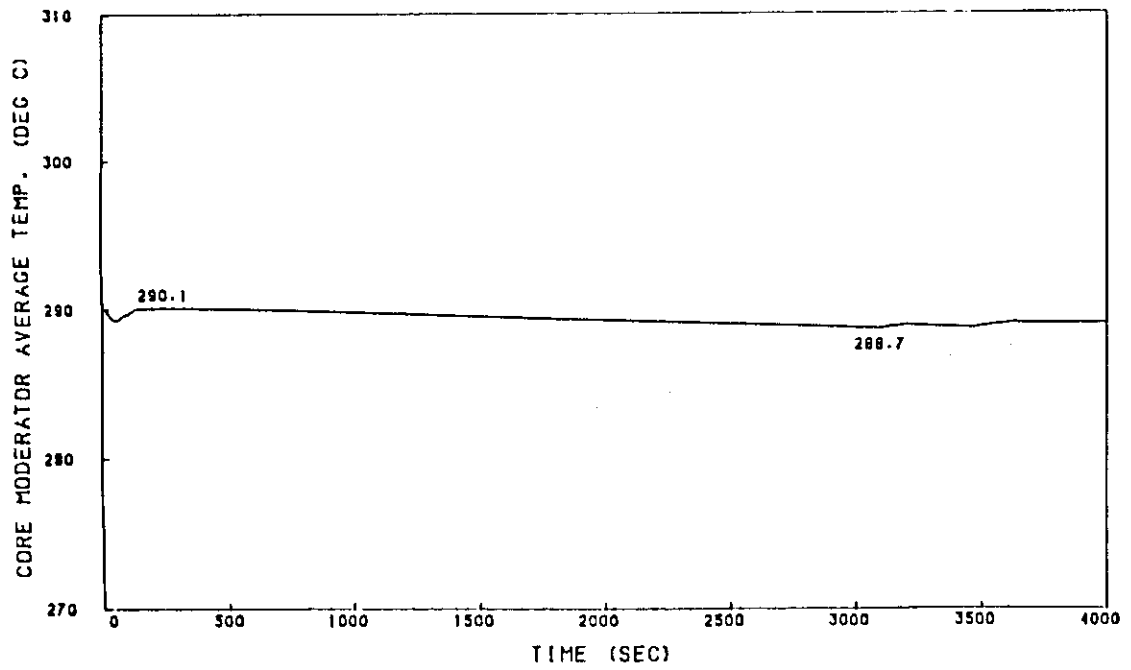


Fig 4.4.4 出力上昇時の一次冷却材炉心平均温度 (一体型炉)

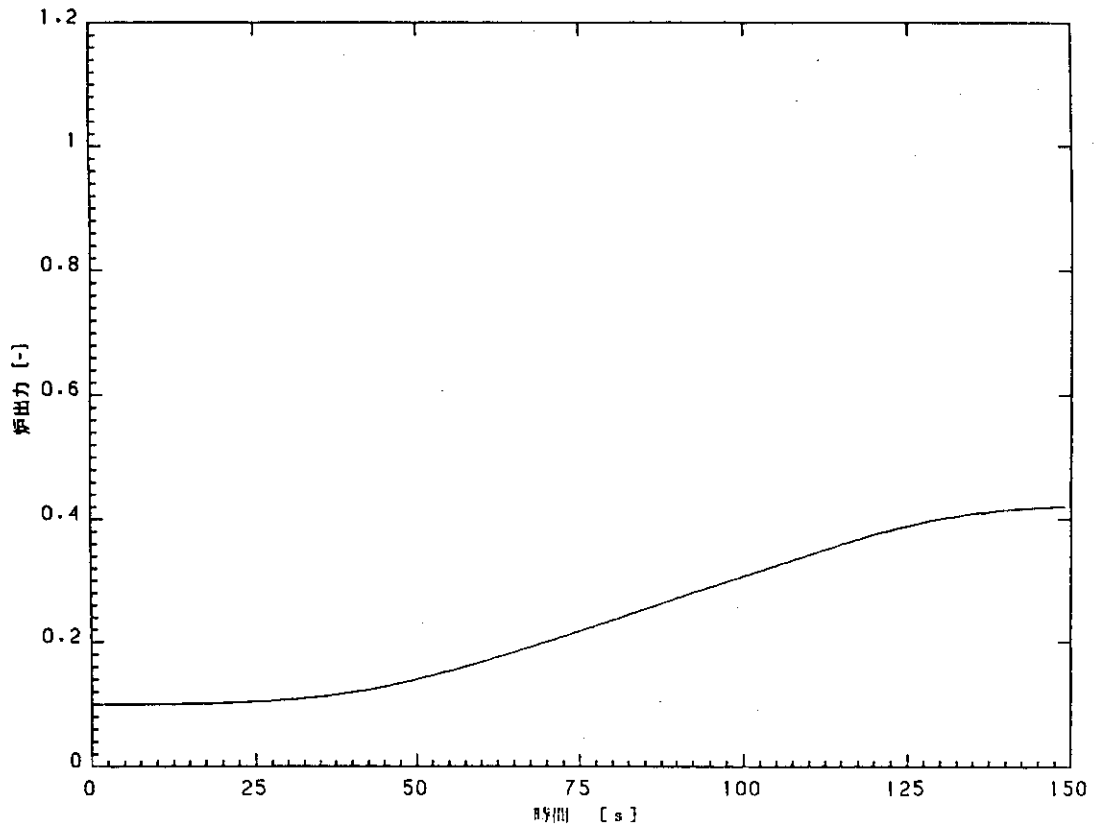


Fig 4.4.5 出力上昇時の原子炉出力 (自己加圧一体型炉)

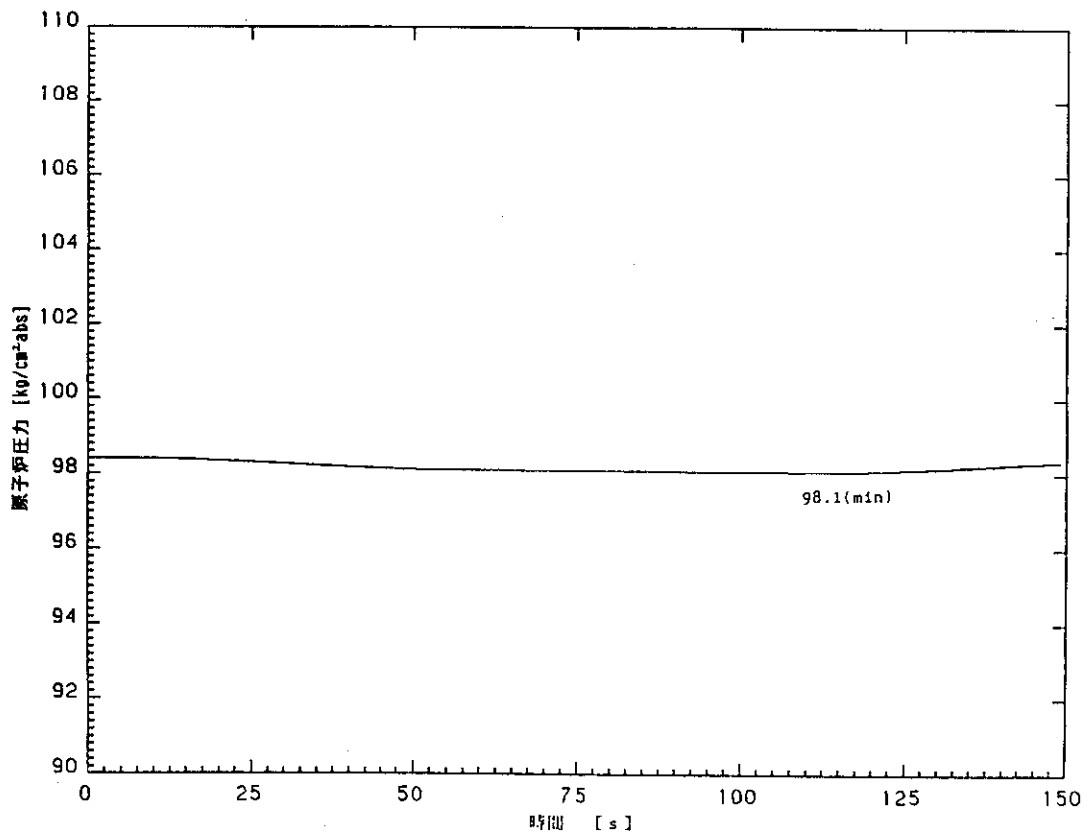


Fig 4.4.6 出力上昇時の原子炉圧力 (自己加圧一体型炉)

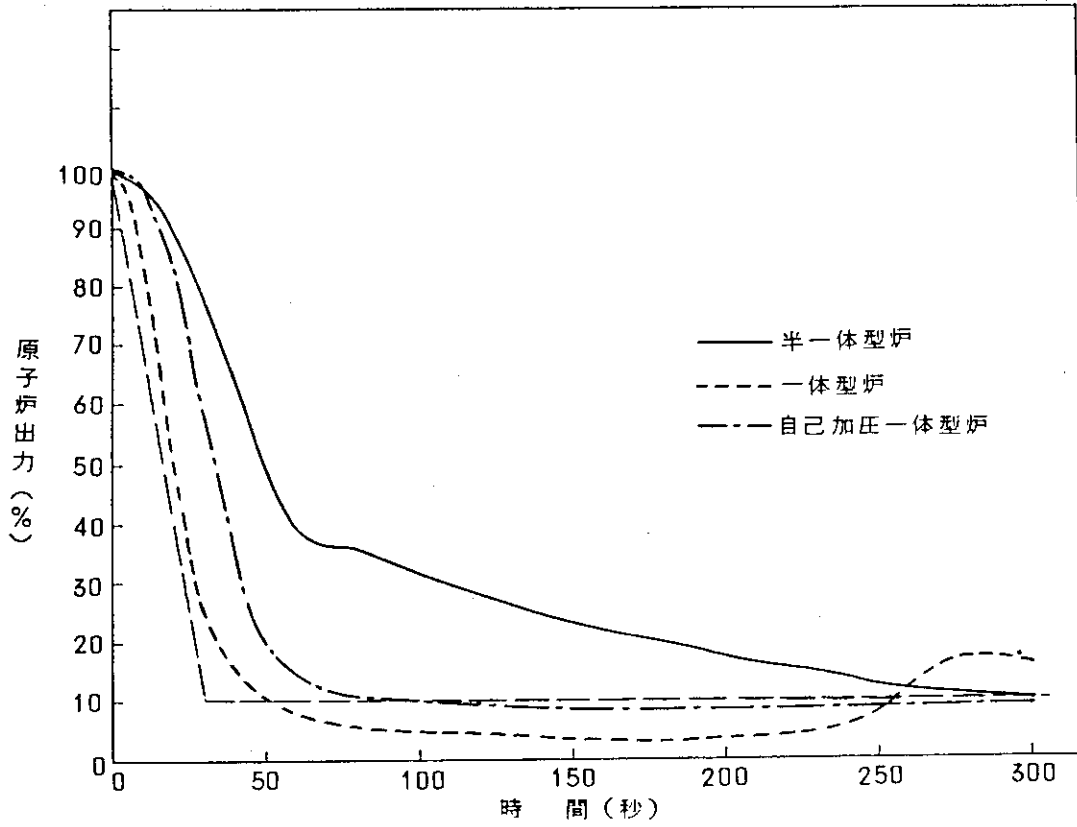


Fig 4.5.1 出力減少時の原子炉出力 (3炉型)

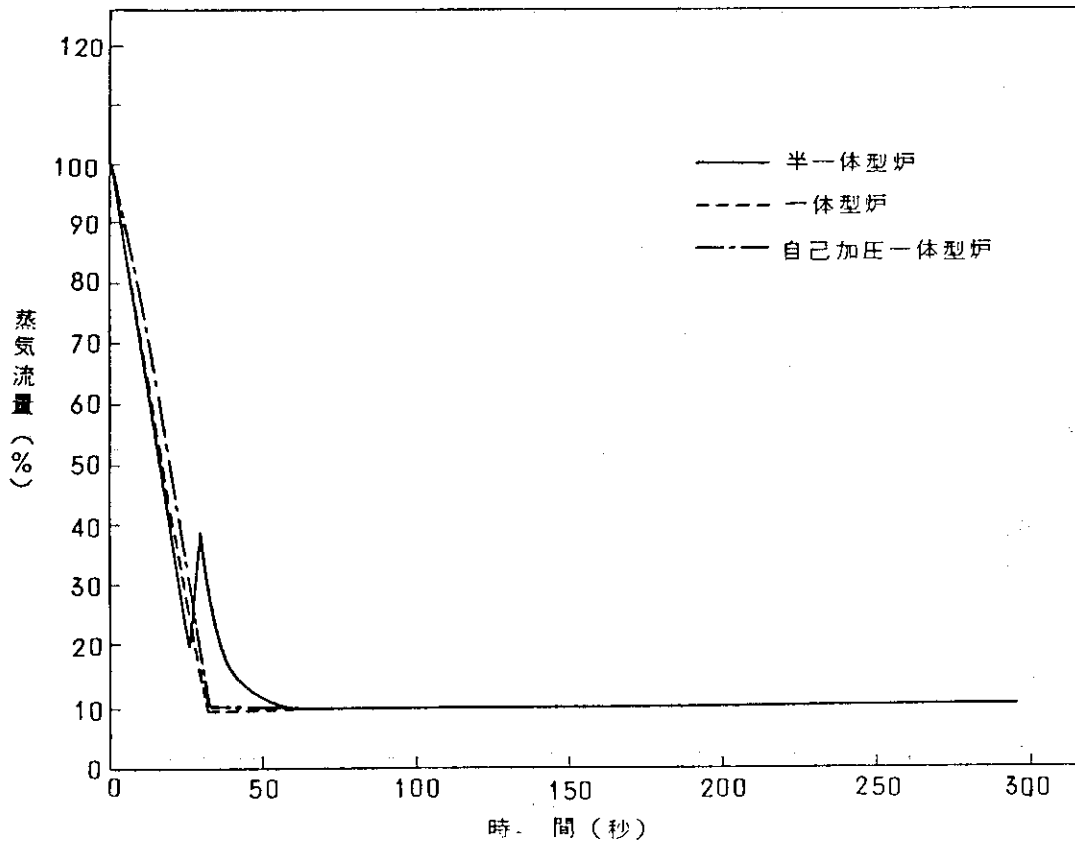


Fig 4.5.2 出力減少時の蒸気流量 (3炉型)

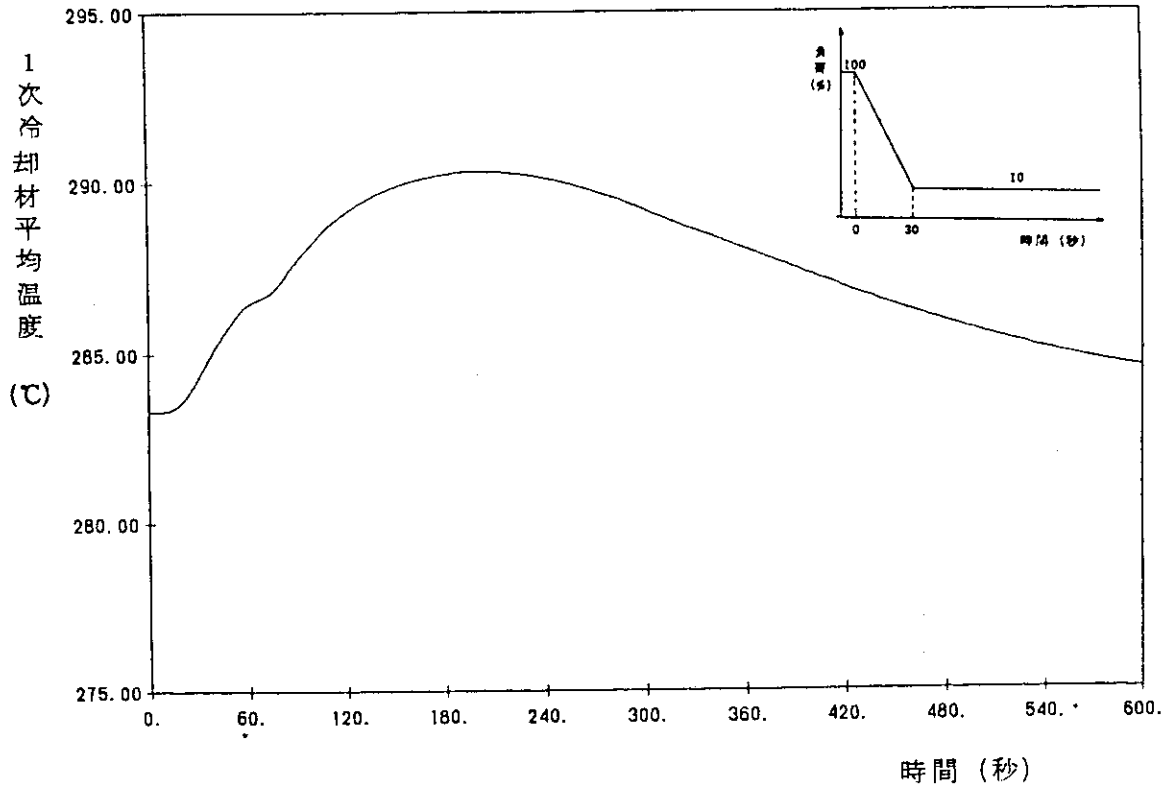


Fig 4.5.3 出力減少時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

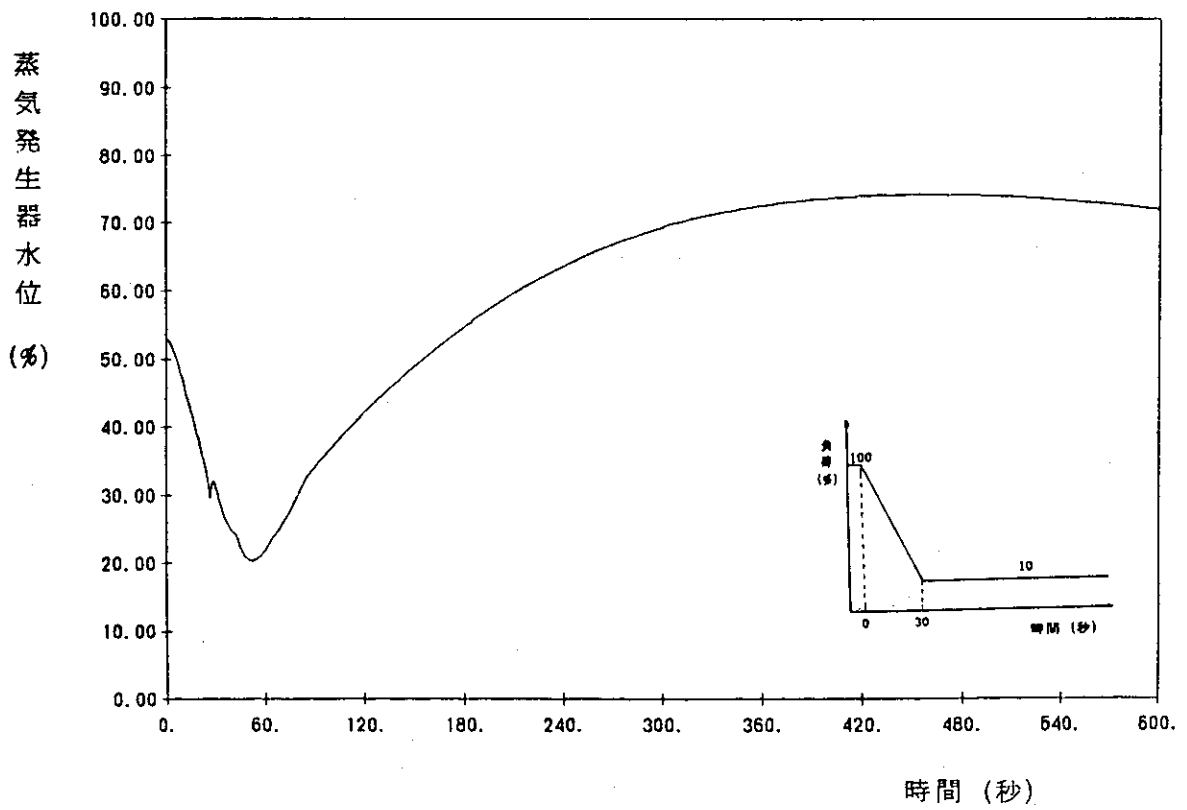


Fig 4.5.4 出力減少時の蒸気発生器水位 (半一体型炉)

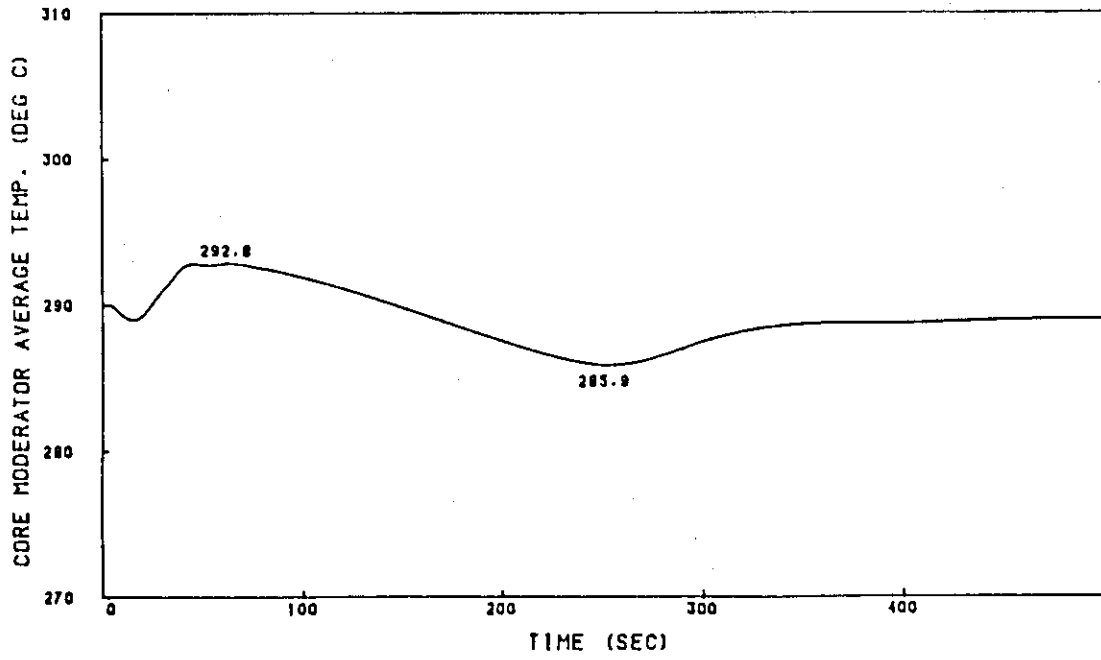


Fig 4.5.7 出力減少時の一次冷却材炉心平均温度 (一体型炉)

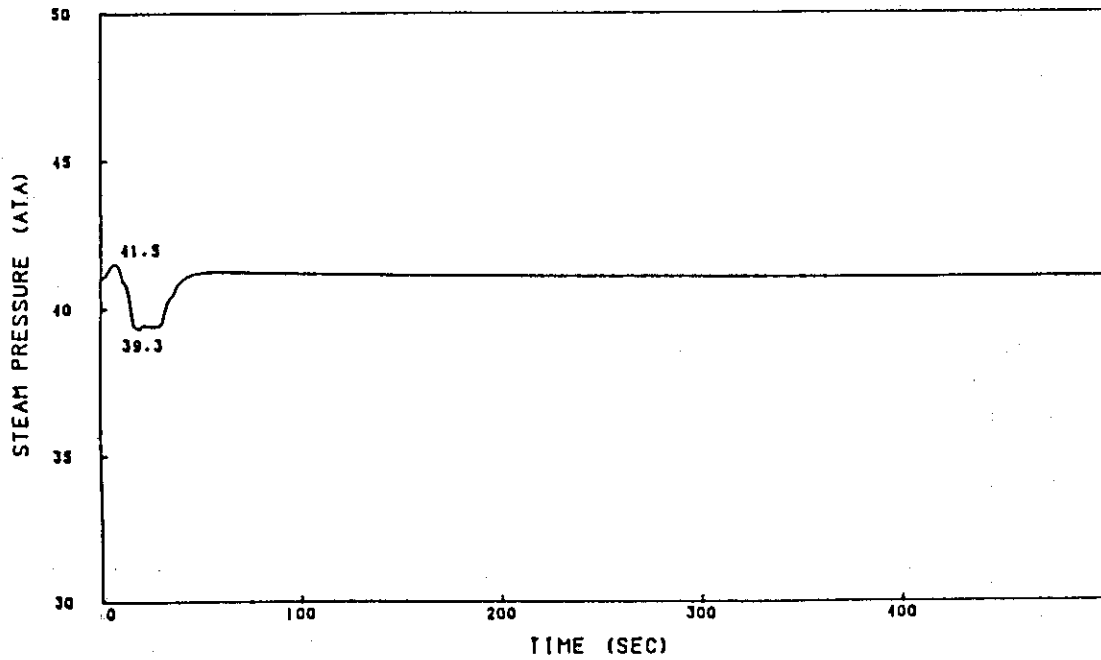


Fig 4.5.8 出力減少時の主蒸気圧力

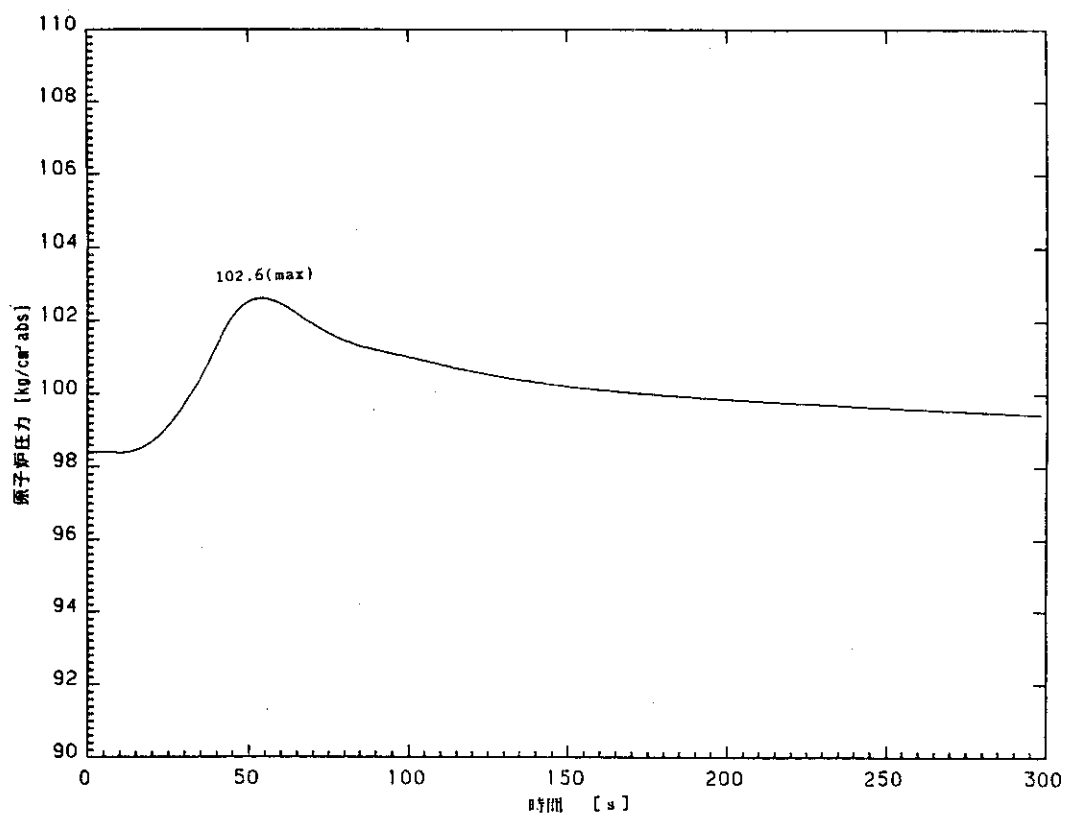


Fig 4.5.9 出力減少時の原子炉出力 (自己加圧一体型炉)

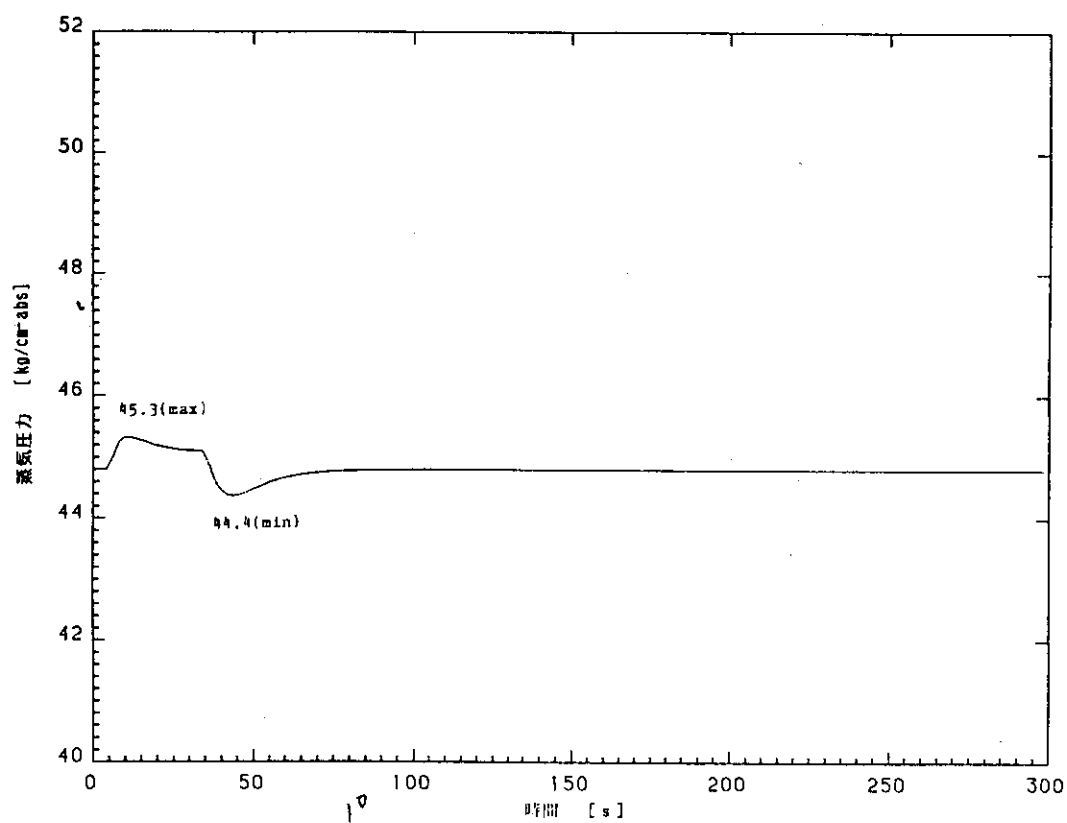


Fig 4.5.10 出力減少時の原子炉出力 (自己加圧一体型炉)

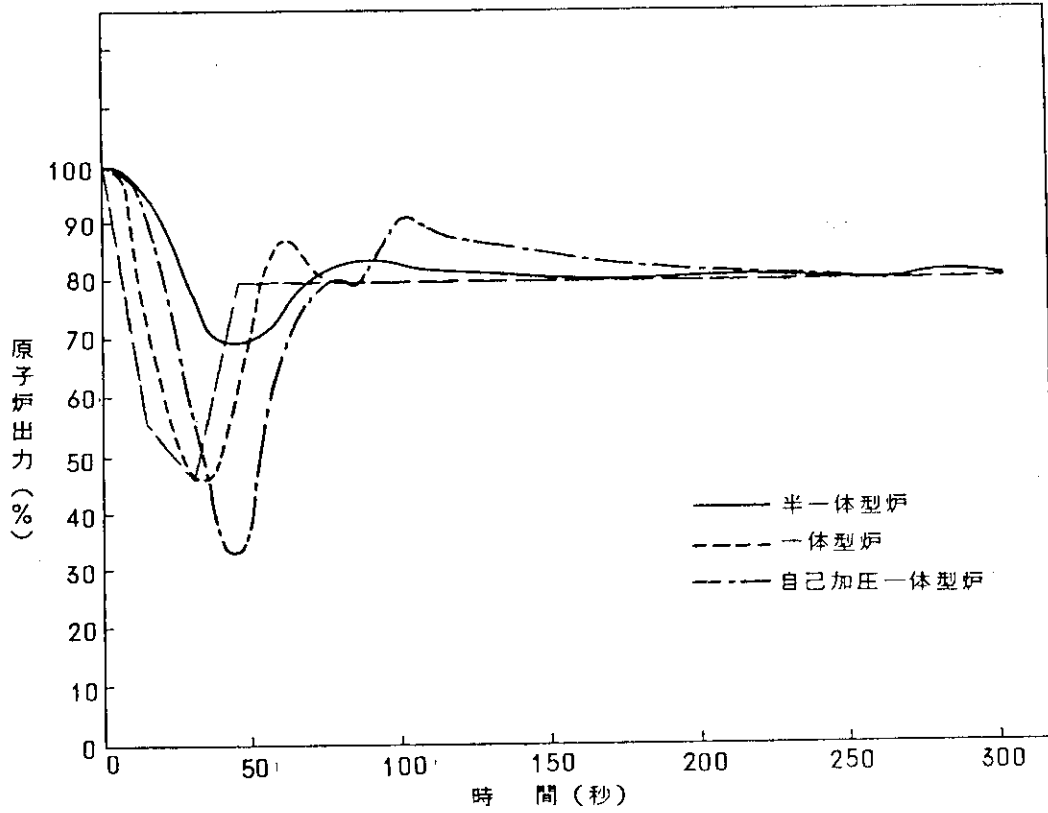


Fig 4.6.1 急速前後進切換時の原子炉出力 (3炉型)

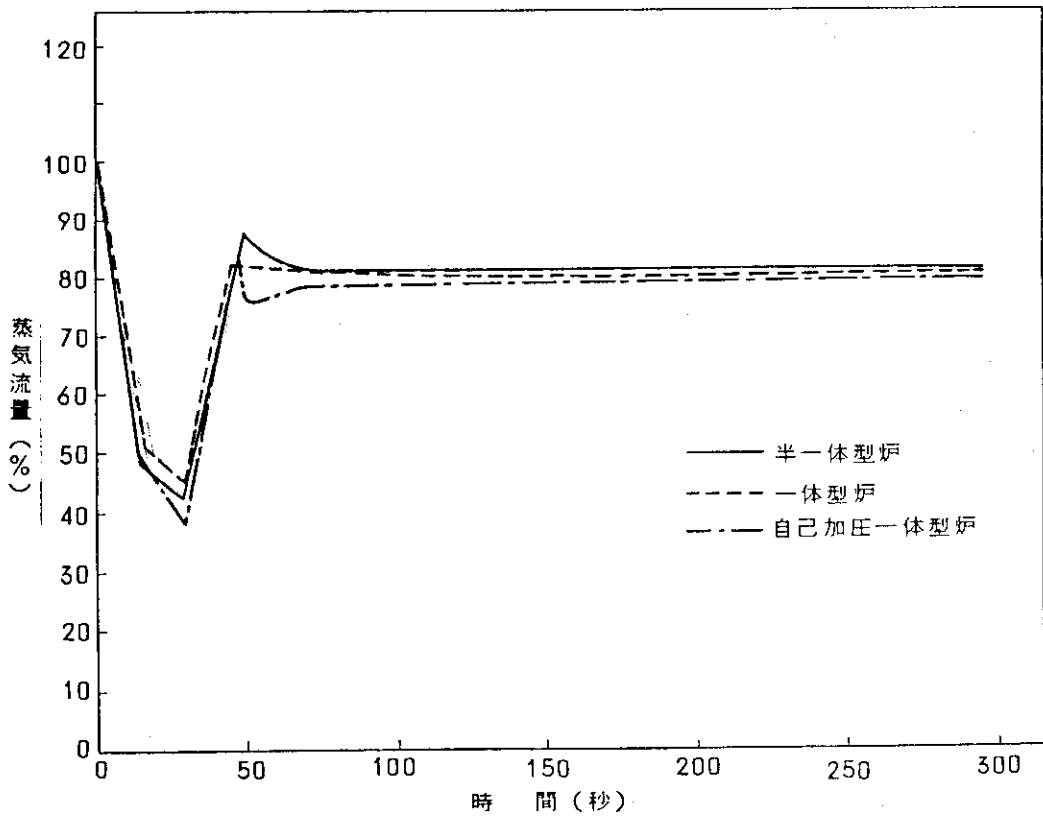


Fig 4.6.2 急速前後進切換時の蒸気流量 (3炉型)

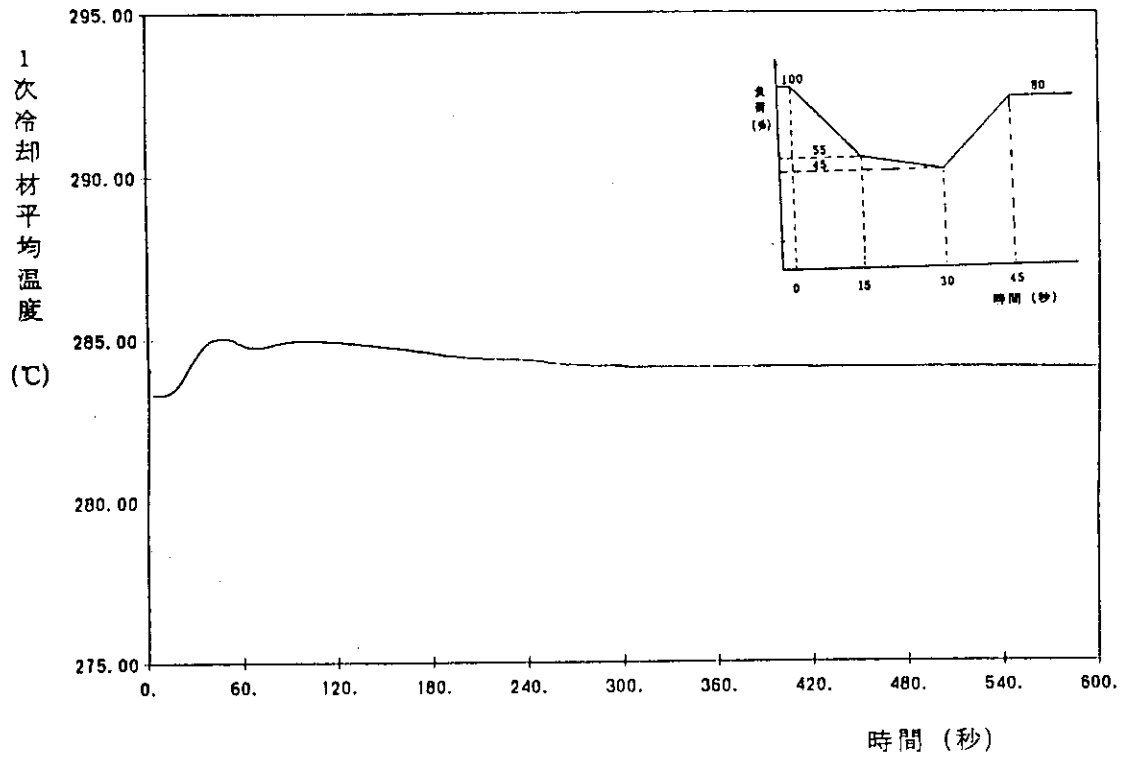


Fig 4.6.3 急速前後切換時の一次冷却材平均温度 (半一体型炉)

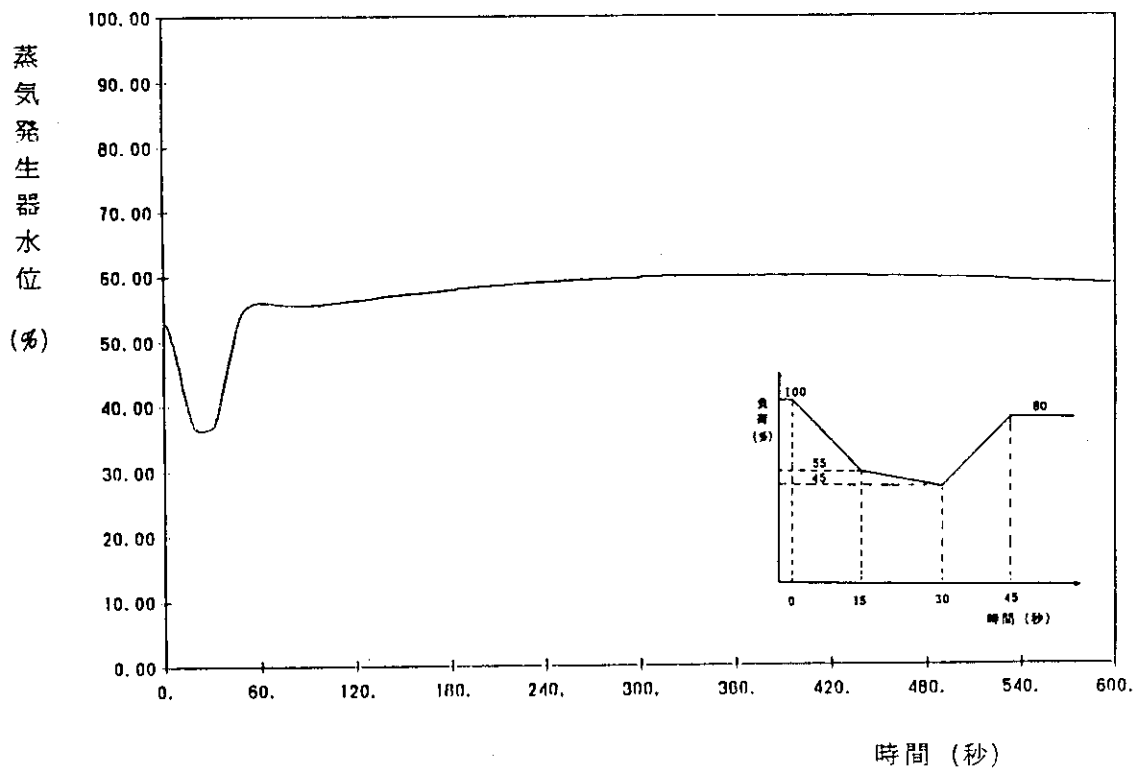


Fig 4.6.4 急速前後進切換時の蒸気発生器水位 (半一体型炉)

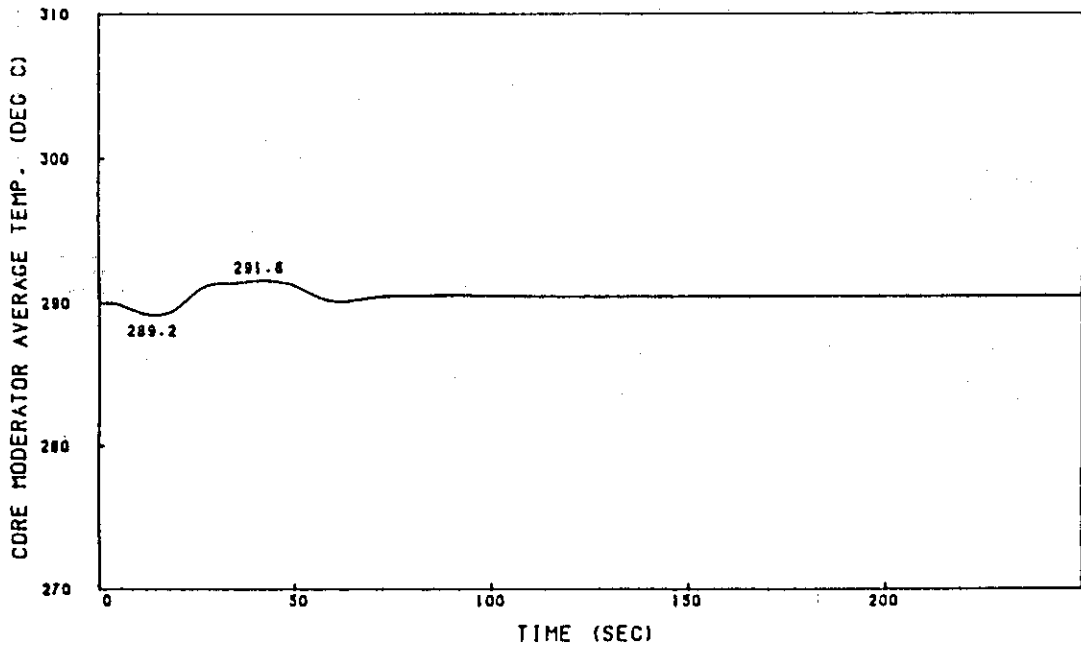


Fig 4.6.5 急速前後進切換時の一次冷却水炉心平均温度 (一体型炉)

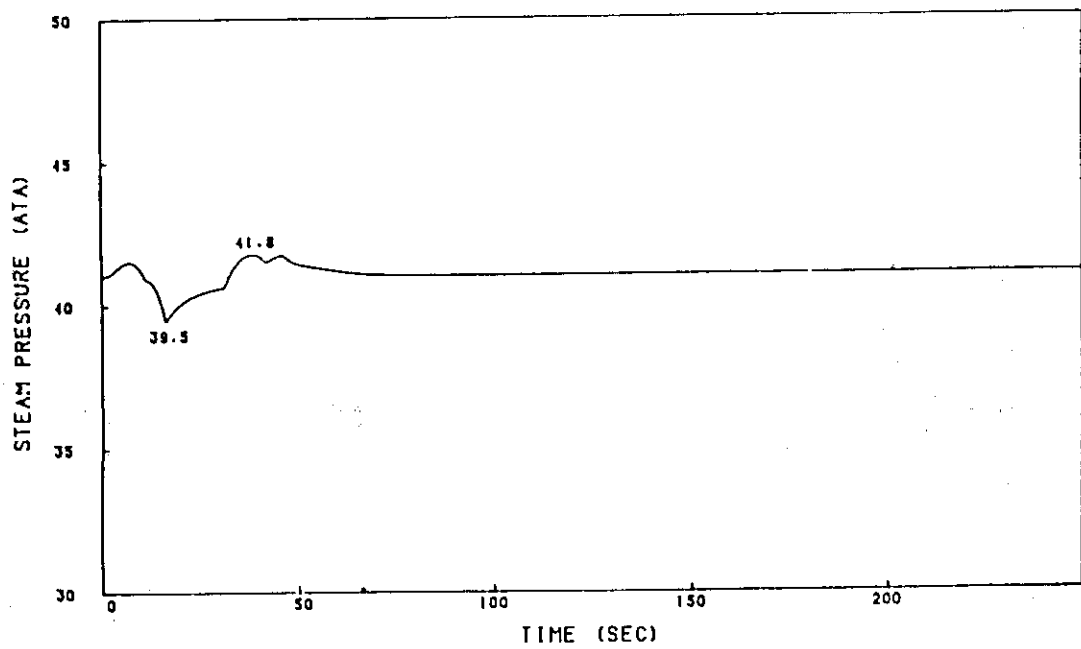


Fig 4.6.6 急速前後進切換時の主蒸気圧力

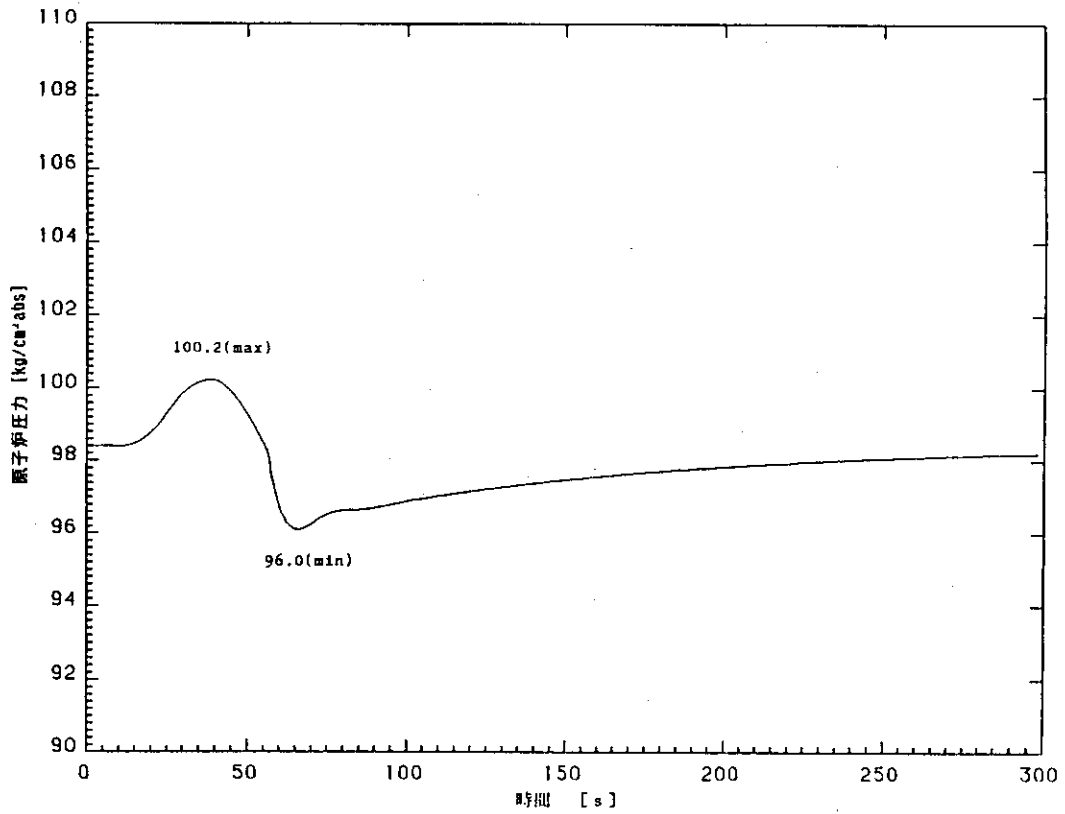


Fig 4.6.7 急速前後進切換時の原子炉圧力 (自己加圧一体型炉)

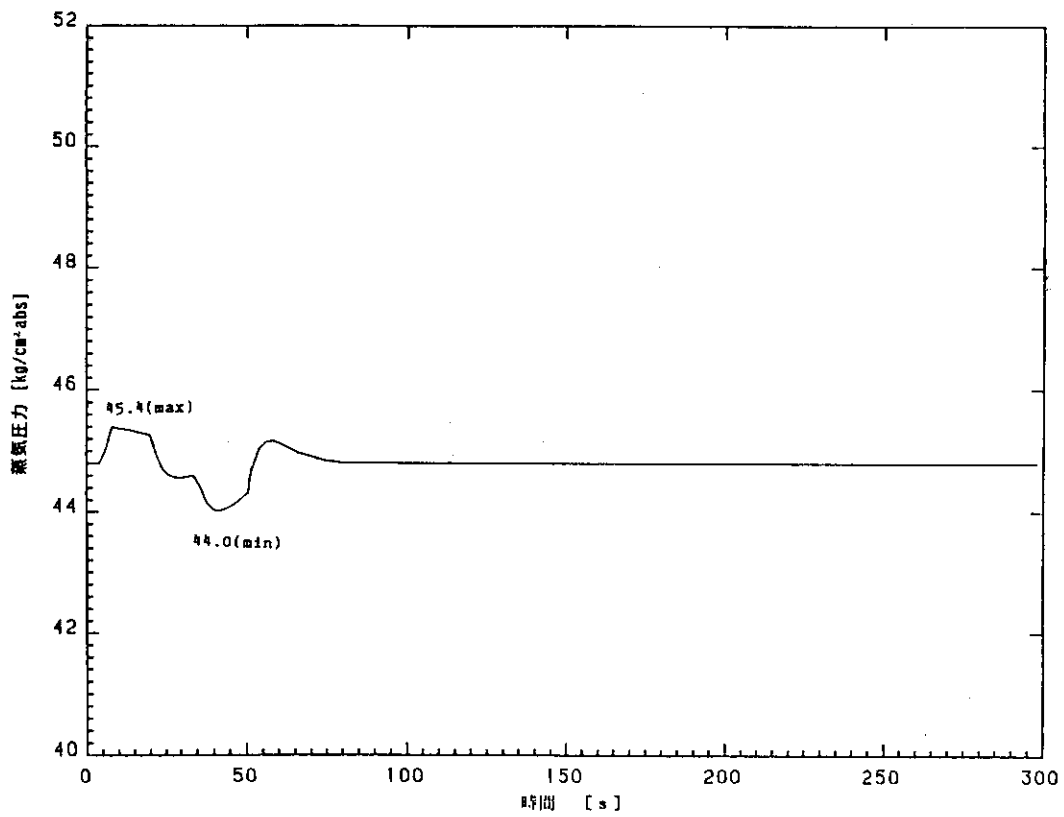


Fig 4.6.8 急速前後進切換時の主蒸気圧力 (自己加圧一体型炉)

5. 試設計動特性比較評価

試設計の各炉型を動特性の観点から比較評価するために、前節に示した各種負荷変動に対する解析結果をとりまとめ、全般的考察を行なう。

試設計3炉型について動特性に影響を与えると思われる代表的な特徴をあげると次の通りである。

半一体型炉；再循環式蒸気発生器。一次冷却材平均温度一定方式。一次冷却材量少（約20t）

一体型炉；貫流式蒸気発生器。一次冷却材平均温度一定方式。一次冷却材量比較的少（約38t）

自己加圧一体型炉；貫流式蒸気発生器。原子炉圧力一定方式。一次冷却材量多（約80t）

半一体型炉は再循環式の蒸気発生器を採用しており、蒸気発生器二次側の状態量の変化により負荷変動を緩和して一次系に伝える。このため、原子炉出力の応答は緩やかでよくオーバーシュートは小さい。負荷変動による燃料の負担は小さい。制御棒制御系は一体型炉と同じく一次冷却材平均温度一定方式を採用しているが、一体型炉に比べて負荷変動による一次冷却材平均温度の変動幅は大きい。この原因は一次冷却材保有水量が半一体型炉は非常に少ないので温度変化が生じ易いことと、制御棒制御系の出力不一致信号のゲインが小さいことによる。半一体型炉は、負荷変動に対し一次系及び二次系の諸パラメータが変動しながら徐々に新しい定常状態に落ちついてゆく。半一体型炉は制御設備の極端な作動を伴うことのない炉プラントの特性への依存度を比較的高くした制御を行なう船用炉である。諸パラメータの整定は3炉型中最も遅い。

一体型炉は対向流型の貫流式蒸気発生器を採用しており、負荷変動の対する応答はきわめて速い。一体型炉では制御設備を積極的に用いることにより、一次系及び二次系の諸パラメータの変動を抑制し短時間で新たな定常状態に整定されることを意図している。このため、制御棒制御系は出力不一致信号に対するゲインが大きく、予測制御の様な制御棒の駆動を行ない、一次冷却材平均温度の変動を小さく抑制している。しかし、この制御の結果として負荷変動による原子炉出力のオーバーシュートがかなり大きく実用のためには改善が必要である。また、燃料の出力変化速度は負荷の変化速度と同等、場合によってはそれ以上の速度が要求されており燃料に対する負担は大きい。これに対し、対負荷変動性能に優れるとされているキャラメル燃料の使用により燃料は健全に保たれるものとしている。一体型炉は給水制御系には給水減少率可変リミッタを設けることにより負荷減少時の一次冷却材温度、圧力の上昇を抑制する等制御設備による積極的な炉プラント制御を図った船用炉プラントである。

自己加圧一体型炉は並行流型の貫流式蒸気発生器を採用しており負荷変動に対する応答は速い。自己加圧一体型炉は、自己制御性を生かした原子炉圧力一定制御を行なう。原子炉の出力と圧力を制御棒制御系で調節し、加圧器を持たないのでその制御系設備は簡素である。一次系の保有水量は他の2炉型に比べてかなり多い。これは自己加圧を行なうためのチムニー部および蒸気ドーム部の容積が大きいからである。自己加圧方式は「オットハーン」において豊富な経験を有する方式であるが、今回の試設計炉の動特性解析では急速な負荷の変動に対してはこの自己制御性は必ずしも良好に働かず、制御棒は他の2炉型に比べて大幅な移動が要求された。また、負荷減少時に蒸気ドーム部において断熱圧縮が生じることによる原子炉圧力低下の遅れ、炉心内での沸騰を許すことによる出力変化の遅れ等の不都合が今回の解析結果において示された。負荷減少時の原子炉圧力低下の遅れの原因は蒸気ドーム部からの放熱がモデル化されていないことにもよる。自己加圧一体型炉の加圧特性については、

別途検討を行なっている。³⁾

改良船用炉の研究に際し、直ちに実用炉を製作するのであれば、再循環式蒸気発生器を有した半一体型炉が適当であると考えられる。一体型炉には改善すべき課題があり、自己加圧一体型炉には充分説明されていない特性がある。現時点での完成度は半一体型炉において最も高い。従来使用されてきた船舶においては原子炉の負荷への即応性の要求はさほど高くない。しかし、将来的には船舶の推進方式が改良され、高性能化が図られることを考慮すれば改良船用炉は負荷への追従性と収束性に優れた原子炉プラントでなければならない。また、船舶は狭水路航行時、荒天航海時他部分負荷で運行することが考えられるので、この点からも安定した質の蒸気を供給できる貫流式蒸気発生器が好ましい。また、制御方式については今回の3炉型の動特性解析から判断して一次冷却材温度一定方式が良いと考えられる。原子炉圧力一定方式は自己加圧方式特有の制御方法であり、システムは簡素化でくるものの今回の動特性解析ではあまり有利な点が見られなかった。従って、動特性の観点からは原子力船研究開発室において開発すべき炉型は一体型炉に近いものと判断される。しかし、現状の一体型炉の制御特性はこれまでに示したようにオーバーシュートが大きいことなどの解決すべき問題点を有している。今後、制御系については新たな制御方式を開発し、必要な場合には制御設備の開発を行なうことにより良好な応答を示す船用炉の開発を進めなければならない。

6. 結 論

動特性の観点から試設計3炉型の比較評価を行なった結果、次のことが明かとなった。

半一体型炉は、実用上の完成度が高く、余裕のある応答特性を示す。一体型炉は、制御特性上改善すべき問題点はあるが高性能炉プラントの可能性を有している。自己加圧一体型炉は、原子炉自体は大型となるがシステムを簡素化できる。

改良船用炉を直ちに実用に供するために製作するのであれば強制加圧方式で再循環式蒸気発生器を備えた炉型が適当と思われる。原子力船研究開発室が将来に向けて、小型高性能プラントを実現すべく研究開発を行う改良船用炉としては強制加圧方式で貫流式蒸気発生器を備えた炉型が適当であると思われる。

参 考 文 献

- 1) BONNEMAY, A., et al., "SIMULATION TOOLS IN CEA" in "BOILER DYNAMICS AND CONTROL IN NUCLEAR POWER STATIONS" BNES Press, 1979.
- 2) R. Fiebig, "DRUCK-Ein Programm zur Berechnung des Dynamischen Verhaltens von Reaktoren von FDR-Typ" GKSS/75/E/27
- 3) 楠剛, 横村武宣, 鍋島邦彦, 島崎潤也, 篠原慶邦, 「自己加圧一体形船用炉の動特性解析コード (ISP DYN) の作成と加圧方式の検討」, JAERI-M-87-213

別途検討を行なっている³⁾。

改良船用炉の研究に際し、直ちに実用炉を製作するのであれば、再循環式蒸気発生器を有した半一体型炉が適当であると考えられる。一体型炉には改善すべき課題があり、自己加圧一体型炉には充分解明されていない特性がある。現時点での完成度は半一体型炉において最も高い。従来使用されてきた船舶においては原子炉の負荷への即応性の要求はさほど高くない。しかし、将来的には船舶の推進方式が改良され、高性能化が図られることを考慮すれば改良船用炉は負荷への追従性と収束性に優れた原子炉プラントでなければならない。また、船舶は狭水路航行時、荒天航海時他部分負荷で運行することが考えられるので、この点からも安定した質の蒸気を供給できる貫流式蒸気発生器が好ましい。また、制御方式については今回の3炉型の動特性解析から判断して一次冷却材温度一定方式が良いと考えられる。原子炉圧力一定方式は自己加圧方式特有の制御方法であり、システムは簡素化でくるものの今回の動特性解析ではあまり有利な点が見られなかった。従って、動特性の観点からは原子力船研究開発室において開発すべき炉型は一体型炉に近いものと判断される。しかし、現状の一体型炉の制御特性はこれまでに示したようにオーバーシュートが大きいことなどの解決すべき問題点を有している。今後、制御系については新たな制御方式を開発し、必要な場合には制御設備の開発を行なうことにより良好な応答を示す船用炉の開発を進めなければならない。

6. 結 論

動特性の観点から試設計3炉型の比較評価を行なった結果、次のことが明かとなった。

半一体型炉は、実用上の完成度が高く、余裕のある応答特性を示す。一体型炉は、制御特性上改善すべき問題点はあるが高性能炉プラントの可能性を有している。自己加圧一体型炉は、原子炉自体は大型となるがシステムを簡素化できる。

改良船用炉を直ちに実用に供するために製作するのであれば強制加圧方式で再循環式蒸気発生器を備えた炉型が適当と思われる。原子力船研究開発室が将来に向けて、小型高性能プラントを実現すべく研究開発を行う改良船用炉としては強制加圧方式で貫流式蒸気発生器を備えた炉型が適当であると思われる。

参 考 文 献

- 1) BONNEMAY, A., et al., "SIMULATION TOOLS IN CEA" in "BOILER DYNAMICS AND CONTROL IN NUCLEAR POWER STATIONS" BNES Press, 1979.
- 2) R. Fiebig, "DRUCK-Ein Programm zur Berechnung des Dynamischen Verhaltens von Reaktoren von FDR-Typ" GKSS/75/E/27
- 3) 楠剛, 横村武宣, 鍋島邦彦, 島崎潤也, 篠原慶邦, 「自己加圧一体形船用炉の動特性解析コード (ISP DYN) の作成と加圧方式の検討」, JAERI-M-87-213