

ATR実証炉の原子炉停止系

Reactor Shutdown System for the Demonstration Advanced Thermal Reactor

堺 公明* Takaaki Sakai

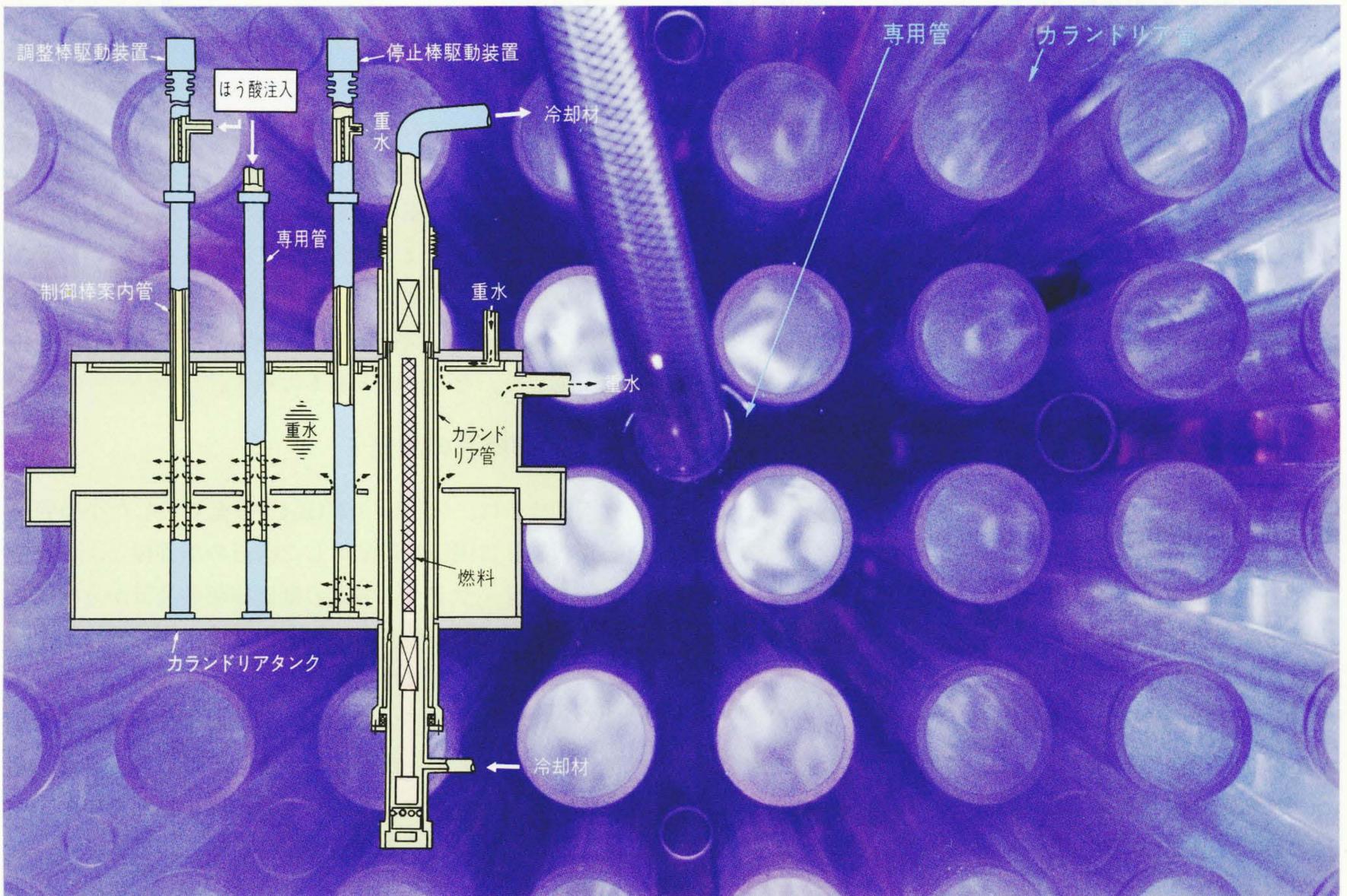
清野英昭* Hideaki Seino

小松康之** Yasuyuki Komatsu

平尾誠造*** Seizō Hirao

佐藤春夫*** Haruo Satō

俵 正文**** Masafumi Tawara



原子炉停止系 ATR実証炉の原子炉停止系は、制御棒系とほう酸急速注入系の二つの系統を持っている。写真は、ほう酸急速注入系可視化試験結果の一例を示す。

ATR(Advanced Thermal Reactor：新型転換炉)実証炉の原子炉停止系には、原理の異なる2種類の系統、すなわち制御棒による主原子炉停止系と、ほう酸溶液の急速注入による後備原子炉停止系を設けている。

両系統とも、緊急時に原子炉を停止するための安

全上重要な系統であるため、その機能が安全上の要求を十分満足するとともに、信頼性の高いシステムであることが必要とされる。

このため、両原子炉停止系について主要機器の開発、機能評価用解析コードの開発を含めた各種開発試験を実施してきた。

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター ** 電源開発株式会社 原子力部 *** 日立製作所 日立工場
**** 日立エンジニアリング株式会社

1 はじめに

ATR(Advanced Thermal Reactor: 新型転換炉)実証炉では原子炉停止系として、主原子炉停止系に制御棒系、後備原子炉停止系にほう酸急速注入系の原理の異なる2系統の炉停止系を設けている。

制御棒系(炉停止を行う停止棒系と炉出力調整を行う調整棒系があるが、以下、炉停止系である停止棒系を制御棒系と言う。)は、中性子吸収材を充てんした制御棒をカランドリアタンク内に急速挿入する方式で、原型炉「ふげん」の実績に基づいた設計としている。ほう酸急速注入系は、「ふげん」の重水ダンプ方式に替え、ほう酸溶液をカランドリアタンク内に急速注入する方式である。

両原子炉停止系については、一連の開発試験を実施し、その成果を逐次設計へ反映するとともに設計内容の妥当性と機能の確認を行ってきた^{1)~6)}。

ここでは、制御棒系とほう酸急速注入系の開発試験を中心に、その内容と成果について述べる。

2 原子炉停止系の概要

ATR実証炉の主原子炉停止系は、カランドリアタンク内重水減速材部に規則的に配置された76本の制御棒から構成される。各制御棒ごとに設けた制御棒駆動装置の作動(電磁クラッチ断)により、これらの制御棒をカランドリアタンク内へ急速挿入することで原子炉の緊急停止が行われる。この制御棒系は、基本的には「ふげん」と同様の設計としているが、原子炉本体のコンパクト化を図

るため、制御棒の小径化などの設計変更を実施している。

また、後備炉停止系には、ほう酸急速注入系を採用することとしている。この系統は、弁を急開放し、加圧されたほう酸溶液を注入管を介してカランドリアタンク内の重水中に急速注入することで原子炉を停止させるシステムである。

後備炉停止系として「ふげん」では、重水をカランドリアタンク外周部のダンプスペースに急速排出する重水ダンプ方式を採用している。この方式では、重水を排出するためのダンプスペースをカランドリアタンク内に設ける必要があるため、原子炉本体が大型化することになる。実証炉では、原子炉本体の大型化を極力抑制することに重点をおき、ほう酸急速注入系を採用している。

制御棒系の設計変更およびほう酸急速注入系の採用については、一連の開発試験結果を踏まえその構成、仕様を決定した。その構成を図1に示す。

3 制御棒系の開発

制御棒系は、炭化ほう素(B_4C)を充てんした小径管を心管の周りに円筒状に配列した構造の制御棒と、これを駆動するワイヤドラム方式の制御棒駆動装置から構成される。制御棒駆動装置の構造を図2に示す。

制御棒系は、「ふげん」の実績を生かし基本構造は「ふげん」と同一としているが、制御棒および同案内管を小径化するとともに、信頼性向上を図るためにスクラム用電磁クラッチを二重コイル式とし、原子炉運転中の試験性、電源系統に対する冗長性を持たせている。

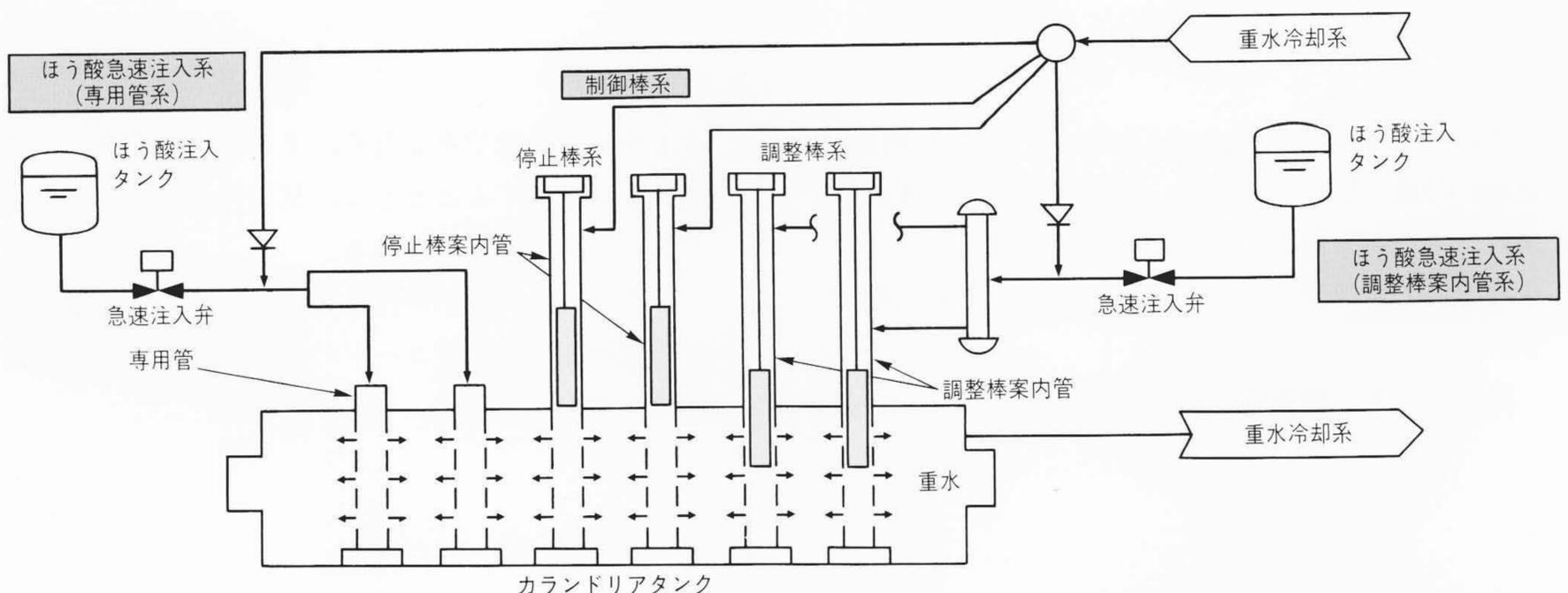


図1 原子炉停止系の構成 制御棒系、ほう酸急速注入系の概略構成を示す。制御棒系が主原子炉停止系であり、ほう酸急速注入系が後備原子炉停止系である。

この制御棒系の挿入特性を実証するために、実機スケールのモックアップによる挿入性試験を実施し、所定の機能を満足することを確認した。

3.1 制御棒系挿入性試験

制御棒系の最も重要な機能は、原子炉緊急時の制御棒挿入性であり、実機スケールの制御棒および制御棒駆動装置を試作し、通常使用条件下での挿入性試験を実施した。

試験結果は、要求条件である全ストローク(全引抜位置から全挿入位置までの距離)の80%挿入時間2秒以下に対し1.5秒以下であり、十分な挿入速度を持つことを確認した。試験結果の一例を図3に示す。

3.2 加振時の制御棒挿入性試験

地震時の挿入性を実証するため、制御棒案内管を加振した状態での挿入性試験を実施した。加振時挿入性試験

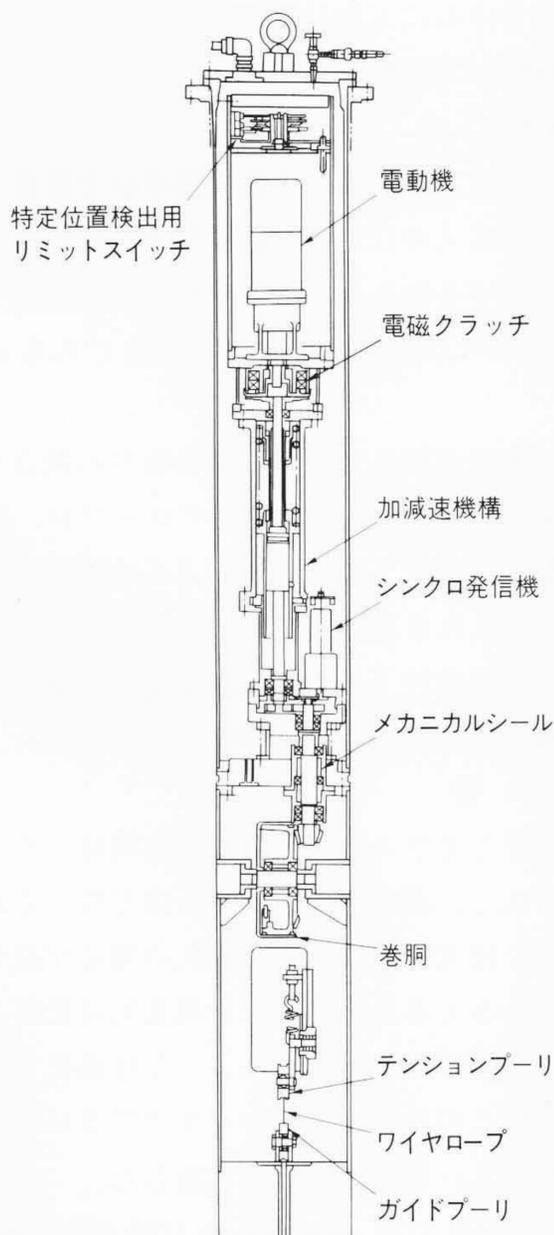


図2 制御棒駆動装置 電動機、電磁クラッチ、巻胴などが長さ3m、直径約0.3mの円筒内に配置される。電動機、シンクロ発信機などの機器は、メカニカルシールにより、下部の重水カバーガス系雰囲気から隔離されている。

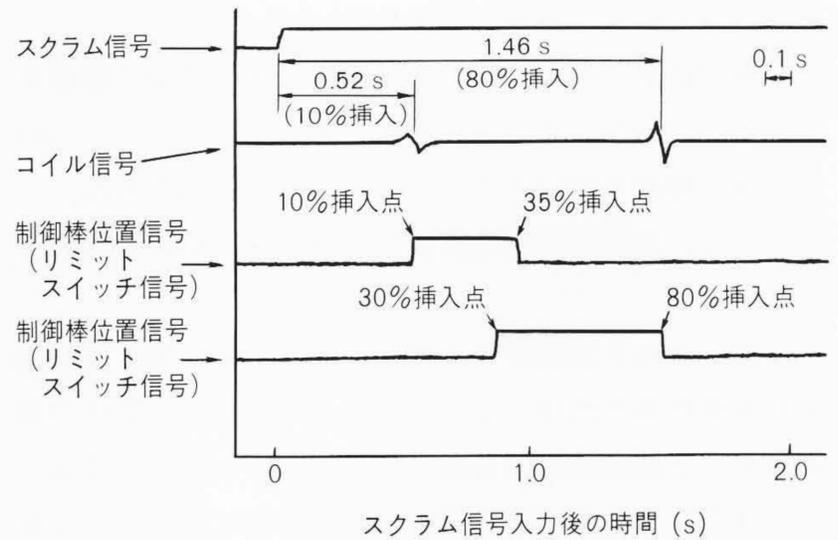


図3 非加振時の制御棒挿入特性 非加振時の制御棒の炉心挿入特性の一例を示す。作動信号発信後、約1.5秒で制御棒ストロークの80%が挿入されている。

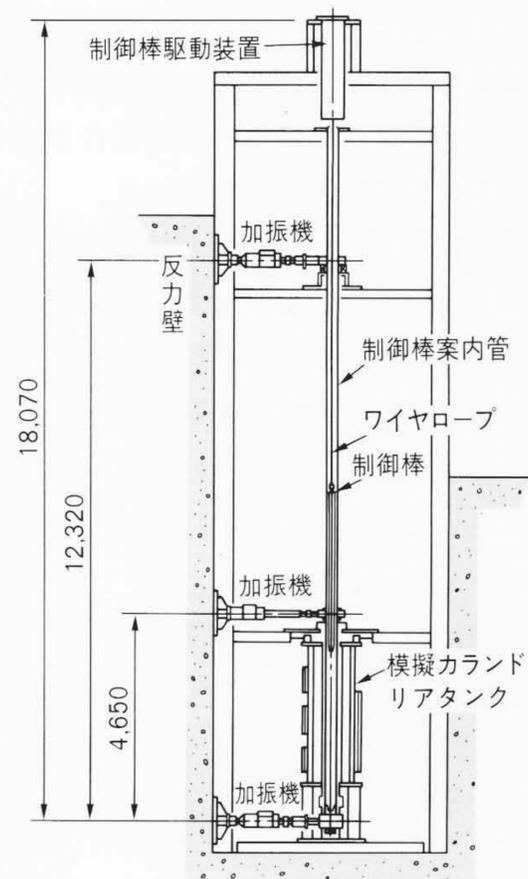


図4 制御棒挿入性振動試験体 加振時の制御棒挿入性試験に用いた試験装置の構成を示す。制御棒は、加振機によって地震模擬振動を受けた状態で模擬カランドリアタンク内に落下させる。

装置の構成を図4に示す。

試験に使用した地震波は、想定実地震波および設計用模擬地震波の2種類である。試験方法は、制御棒案内管に加わる地震荷重の伝達経路および各床レベルでの加速度を模擬できる多点制御同期加振方式とし、挿入性の余裕を評価するため、設計値の10%増までの地震波を設定し加振した。また、制御棒の挿入性に大きく影響する制御棒案内管の変位を計測し、同案内管の変位が最大とな

る条件下で挿入性試験を実施した。

試験の結果、挿入速度は非加振時に比べ多少の影響を受けるが、全ケースとも目標値である全ストロークの80%、挿入時間2秒以下を満足することが確認された。一例として、設計用模擬地震波使用時の試験結果を図5に示す。

なお、これら加振時での挿入性実証試験に加え制御棒駆動装置自体を直接加振する試験も実施し、地震時の制御棒および制御棒駆動装置自体の耐震性と機能を確認した。また、これら一連の確証試験の結果に基づき、加振時の制御棒挿入挙動のシミュレーション手法を検証している。その一例を図6に示す。

4 ほう酸急速注入系の開発

ほう酸急速注入系は、ほう酸溶液を加圧保持する注入タンク、作動信号により開作動する急速注入弁、ほう酸溶液をカランドリアタンク内重水中に混合させる注入管およびそれらをつなぐ配管で構成される。

注入管の種類により、専用管系と調整棒案内管系があり、おのおの2系統の4系統設けている。専用管系の注入管本数は4本と少ないが、より急速にほう酸溶液を注入する能力を有し、調整棒案内管系は専用管系に引き続き16本の注入管を介してカランドリアタンク内広範囲にほう酸溶液を注入し、原子炉停止に必要な投入反応度を確保する機能を分担している。

本系統の開発については、急速注入弁などの主要機器の試作開発に加え、ほう酸溶液の重水中への注入特性、注入されたほう酸溶液による反応度投入特性とを適切に評価する手法などの性能面での確証を必要とする。

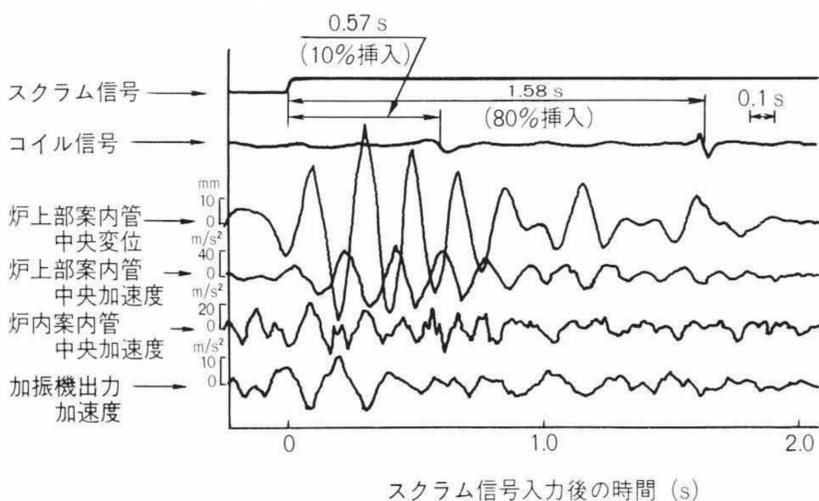


図5 加振時の制御棒挿入特性設計用模擬地震波加振応答
模擬加振状態での制御棒炉心挿入特性の一例を示す。加振時でも作動信号発信後、約1.6秒で制御棒ストロークの80%が挿入されている。

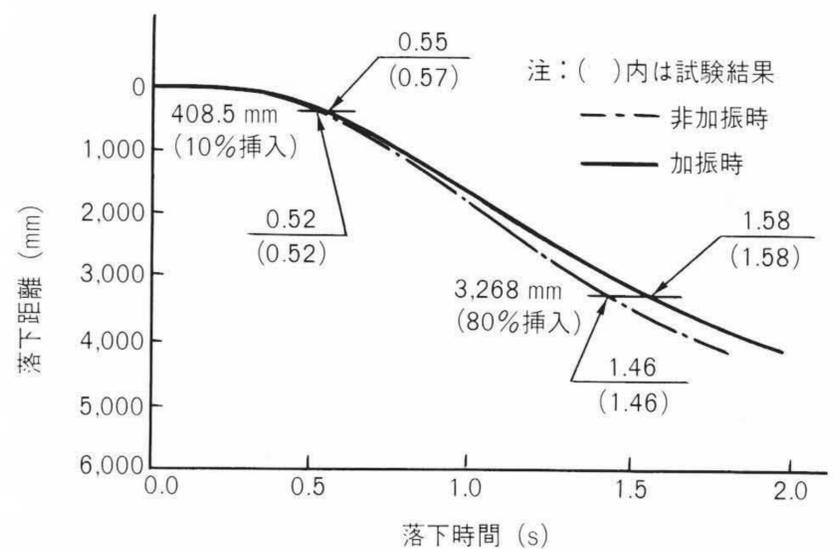


図6 制御棒挿入特性シミュレーション例 シミュレーションにより、非加振時および加振時の制御棒挿入特性を高精度で予測可能である。

これらの開発は、一連の開発・実証試験として、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの実規模装置を用いた試験を中心に実施している。

4.1 主要機器の開発

4.1.1 急速注入弁

ほう酸急速注入系を構成する機器の中で重要な動的機器となる急速注入弁は、作動信号が入った場合早くかつ確実に開作動するとともに、ほう酸水の急速注入という仕様を満たすべく流動抵抗の小さい弁である必要がある。

これらの機能を満足するため、各種弁の調査を行い、弁体には流動抵抗の観点からY型グローブ弁、駆動部には高速作動のためダブルピストン方式の駆動機構を用いることとし、これを基に実規模の弁を試作した。試作弁に対して、地震条件下および高温環境条件下を含む各種試験を実施し、その機能と信頼性を確認した。

4.1.2 注入管

注入管を介して注入されたほう酸溶液は、その重水中混合範囲が広く、濃度が均一であるほど投入される反応度は大きい。注入管に設ける吐出孔の選定が混合特性に大きな影響を与えるため、これを視覚的に把握し、注入管周りの混合特性が良好となるような吐出孔を選定する必要がある。このため、 $\frac{1}{3}$ スケールのアクリル製模擬試験装置を製作し、可視化試験を実施した。

試験は、吐出孔の数、径方向および軸方向位置を変え、ほう酸溶液を模擬した着色水の注入管周りの過渡変化を高速度カメラで観察する方法で実施した。可視化試験の一例として専用管での混合状態を33ページの写真で示す

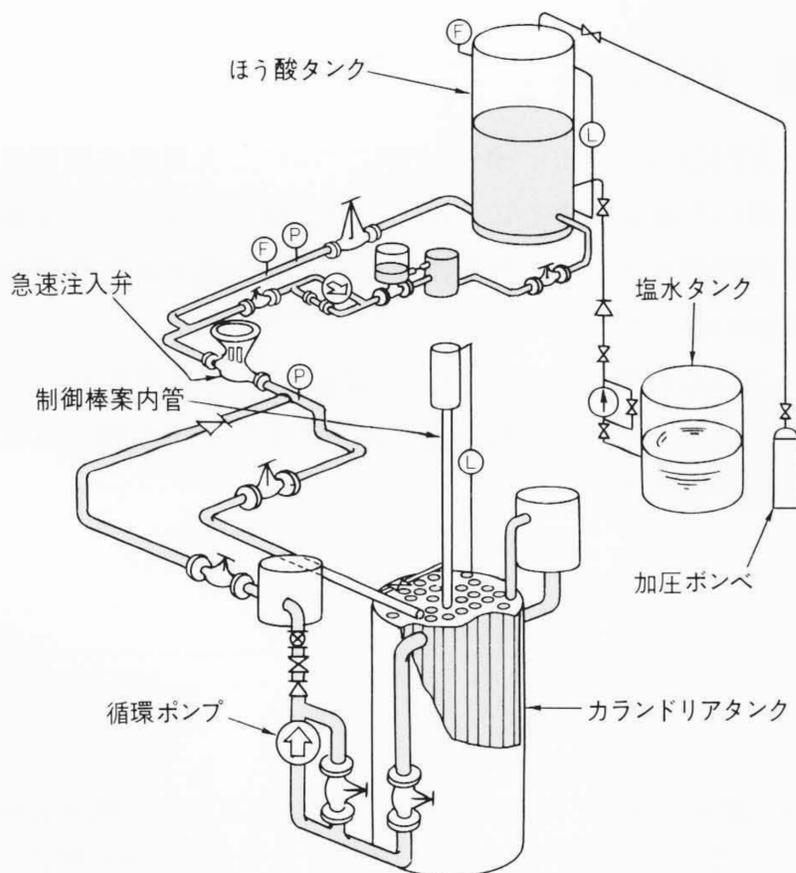
が、良好な混合状態が作り出されている。吐出孔は、この試験結果を踏まえ軸方向に10段、径方向に直径約5 mmの穴を16か所に設けた仕様を選定することとした。

4.2 流動特性評価手法の開発

ほう酸急速注入系の作動開始から終了までの一連の動作は数秒以内であり、ほう酸による投入反応度を適切に評価するためには、この間の炉心へのほう酸溶液到達時間と注入量を精度よく評価することが求められる。

このため、ほう酸注入系のタンク、配管などの各位置での圧力、流量、水位の過渡変化を予測する解析コード (APRICOT) を開発した。このコードの検証および設計条件下での流動状態を確認するため、試験装置を製作し流動特性試験を実施した。試験装置は、実機のほう酸急速注入系およびカランドリアタンク構造物などをほぼ実規模で模擬したものである。その構成を図7に示す。

流動特性試験は、実機の注入速度、注入量を包絡した条件で実施し、その結果と解析結果を比較することで解析コードの精度評価を行った。専用管系の評価例を図8に示すが、このコードは実機の注入速度を包絡した全試験範囲に対して高精度 ($\pm 5\%$) でほう酸注入特性を評価できることを確認した。



注：略語説明 (P) (圧力計), (F) (流量計), (L) (水位計)

図7 流動特性試験装置 ほう酸急速注入系の流動特性試験に用いた実機と同スケールのモックアップ試験装置を示す。この装置は、ほう酸溶液の混合特性試験にも用いている。

また、このコードを用いて実機の注入特性を解析し、系統作動中の平均注入流量として、専用管で40 l/s、調整棒案内管で16 l/sの目標値を達成することを確認した。

4.3 反応度評価手法の開発および評価

ほう酸による投入反応度の評価は、流動特性解析から得られたほう酸溶液注入量をもとに核計算により行う。

ほう酸溶液の重水中での濃度分布モデルは、図9に示す注入管周囲の4×4チャンネル範囲に対して、内外2領域で濃度を変える(各領域内は均一濃度)モデルを採用している。設計用反応度評価は、この濃度分布モデルを用いて実施している(設計評価モデル)。

そこで、この反応度評価モデルの妥当性および保守性を確認するため、試験に基づく詳細な3次元ほう酸濃度分布を用いた投入反応度解析(詳細実験評価モデル)との比較評価を実施した。詳細実験評価モデルは、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの重水臨界実験装置を用いた核的性能試験での測定結果とよく一致することが確認されている。

詳細実験評価モデルに使用する注入管周りのほう酸濃度分布を測定するため、流動特性試験用に製作した実機模擬試験装置を用いて混合特性試験を実施した。この試験では、ほう酸溶液の代わりに塩水を使用し、注入管周りの塩水濃度変化を4×4チャンネル範囲に設置した約

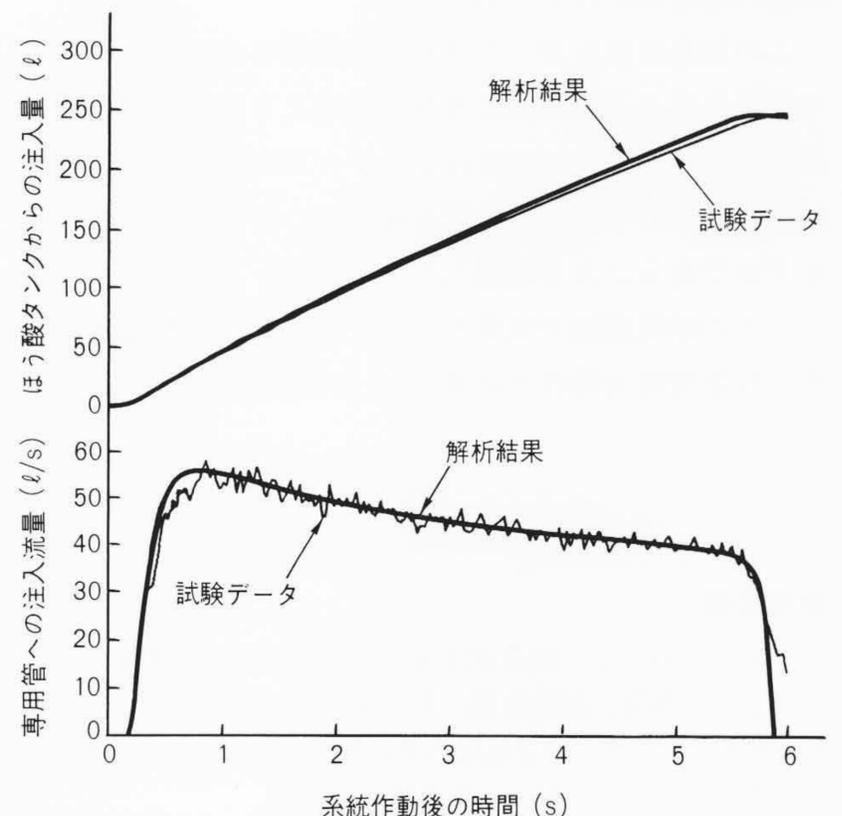


図8 ほう酸注入特性解析例 流動特性試験データと流動解析コードの計算結果の比較例を示す。ほう酸タンクからの注入量、注入流量の各特性とも高精度で予測可能である。

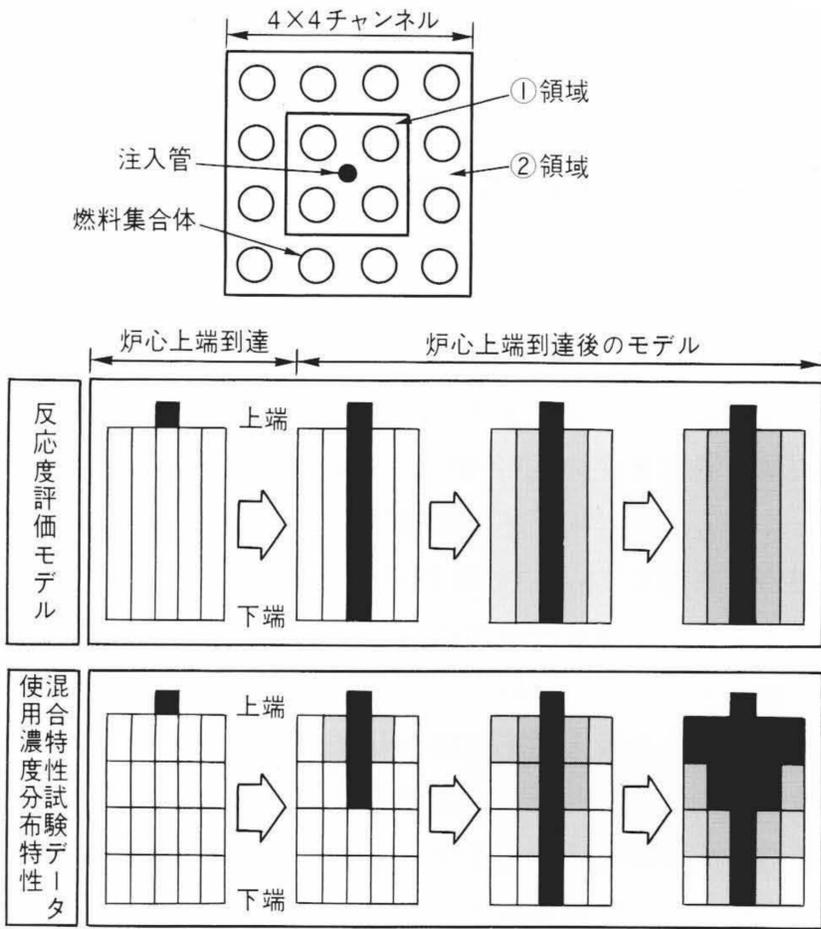
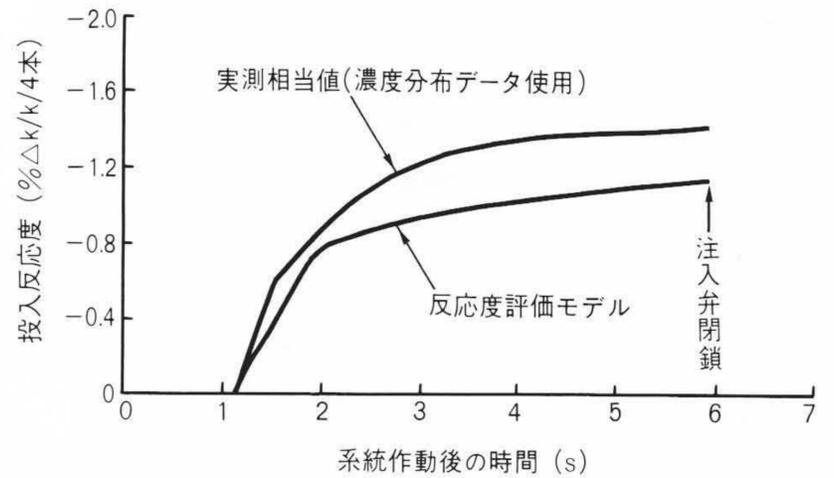


図9 反応度評価モデルと濃度分布特性 炉心の重水中へ注入されたほう酸による投入反応度計算用の濃度拡散モデルを示す。上段の設計用反応度評価モデルでは、炉心下端到達までは注入管吐出孔から流出せず、下端到達後①および②領域に均一に拡散するモデルを採用することとしている。下段は、設計用反応度評価モデルとの比較に用いた混合特性試験データによる三次元的濃度分布特性である。

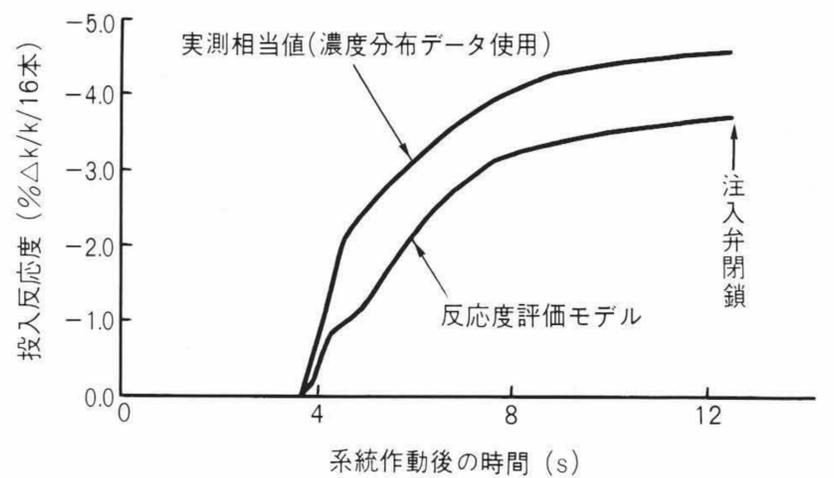
50個の導電率計により測定した。

この測定結果を用いた詳細実験評価モデルと設計評価モデルとによる投入反応度解析結果とを比較して、図10に示す。このように設計評価モデルが専用管系、調整棒案内管系のいずれに対しても保守的な評価結果を与えるモデルであることを確認した。

以上の開発試験の成果を用いて、実機ほう酸急速注入系の反応度投入特性を評価し、その機能を確認している。



(a) 専用管系



(b) 調整棒案内管系

図10 投入反応度の比較 炉心重水中のほう酸濃度に設計用反応度評価モデルと混合特性試験の濃度分布を用いた場合の投入反応度の比較例を示す。設計モデルは、適度の保守性を持ったモデルであると言える。

5 おわりに

ATR実証炉の原子炉停止系について、実規模試験装置を用いた確認を中心に一連の開発試験を実施し、主要機器の開発およびその性能確認ならびにシステム能力評価手法の確立を図ってきた。

これらの開発成果を用いて設計内容の妥当性を評価し、制御棒系、ほう酸急速注入系ともに十分な機能と信頼性を持つことを確認している。

参考文献

- 1) 望月, 外: ほう酸急速注入による新型転換炉実証炉用停止系の開発, 動燃技報, No.56(1985-12)
- 2) 望月, 外: ほう酸急速注入系の開発(混合特性), 日本原子力学会, 昭60分科会, E57(1985-10)
- 3) 清野: ほう酸急速注入系の開発(反応度特性), 日本原子力学会, 昭60分科会, E58(1985-10)
- 4) 佐藤, 外: 制御棒挿入性試験, 日本原子力学会, 昭60分科会, E53(1985-10)
- 5) 望月, 外: ATR実証炉用ポイズン急速注入系開発試験(その1)流動特性試験, 日本原子力学会, 昭58分科会, B32(1983-9)
- 6) 坂下, 外: ATR実証炉用ポイズン急速注入系開発試験(その2)設計コードの精密検証, 日本原子力学会, 昭58分科会, B33(1983-9)