

原子炉冷却材再循環系機器の国産化と信頼性向上

Domestic Manufacturing and Reliability Improvement of Reactor Water Recirculation Equipment

沸騰水型原子力発電プラントでは、原子炉冷却材再循環系は、原子炉出力を制御する重要なシステムの一つであり、その構成機器には、高い信頼性と制御性が要求されている。これまで、多くのプラントで再循環ポンプ及び流体継手などは、輸入品が使用されてきたが、このたび、これらの機器の開発、試験を行なって国産化体制を確立し、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機に採用された。

特に、流体継手は優れた制御特性を得るため、解析による動特性評価を行なうとともに、これまでの国産流体継手の実績に改良を加え、組合せ試験によるシステマ的评价を行なった。本機器は今後、日立標準として各プラントに納入していく予定である。

小林英一*Hidekazu Kobayashi

大井 枉雄**Masao Ôi

志田統一*Tôichi Shida

横森 剛***Takashi Yokomori

1 緒 言

原子力発電所の電力系統に占める割合が増加するに伴い、原子力発電機器に対する信頼性、保守性のいっそうの向上が要求されている。特に、原子炉冷却材再循環系機器は原子炉出力を制御する重要な設備の一つであり、制御性だけでなく信頼性、保守性に優れたものであることが必要である。表1に示すように、電気出力460MW級及び780MW級の原子力発電設備では、原子炉冷却材再循環系機器の一部に輸入品が使用されていたが、信頼性、保守性の向上及びプラントの運転性向上を図るため、これらの機器について国産化体制を確立した。

本論文では、このたび東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機に採用された再循環ポンプ、駆動用電動機及び可変周波数電源設備の国産化について述べる。

図1に原子炉炉心流量調節による出力制御系概略構成を示す。原子炉冷却材再循環系は、2ループあって、各ループごとに再循環ポンプと同駆動電動機、及びその可変周波数電源設備¹⁾がある。可変周波数電源設備は、流体継手を介して駆動用誘導電動機と可変周波数交流発電機を連結したもので、この流体継手によって、約20～100%の範囲で交流発電機の回転数を変えることができる。この交流発電機の回転数(周波数)を制御して、再循環ポンプ・電動機の回転速度を調節し、原子炉冷却材の再循環流量を調節することによって、原子炉炉心を流れる冷却材の流量を調節する。流体継手の回転速度の制御は、羽根車内の油の流量を、すくい管の位置を調節することによって行なう。このすくい管は、速度制御装置からの指令信号によって、すくい管駆動装置で調節される。

2 原子炉冷却材再循環系と制御

BWR(沸騰水型原子力発電)プラントの出力制御は、制御棒の位置又は原子炉炉心の流量を調節して行なう。特に、この原子炉炉心の流量調節による出力制御は、原子炉炉心内に存在する蒸気量(ボイド量)の反応度効果を利用したもので、自己制御性をもっているとともに優れた即応性をもっている。

3 原子炉冷却材再循環系の基本設計条件

本系統の構成機器を設計製作するに当たり、下記の点を考慮した。

(1) プラントの設備利用率の向上

原子力発電プラントでは、原子炉出力を一定に保つため燃料の燃焼に伴い、通常一定期間ごとに制御棒パターンの交換を行なっている。これに対し、炉心流量に余裕をもたせ、その流量調節によって原子炉出力を制御し、制御棒パターンの交換期間を長くすることによって、プラントの設備利用率を向上できる。本系統の設計に当たり、前記の炉心流量調節運転が可能のように系統構成機器の仕様を決定した。ここで、再循環ポンプの回転速度を定格の102%で連続運転可能なものとすれば、プラントの設備利用率は約1%改善できる。

(2) 負荷追従性

将来、自動負荷追従運転を行なう場合に対処し、出力変化率30%/分の能力をもつ設計とする。

(3) 出力安定性

PCIOMR^{*1)}(Pre-Conditioning Interim Operating Man-

表1 各プラントでの原子炉再循環系機器の国産化状況 東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機ですべての原子炉冷却材再循環系機器の国産化が達成された。

機 器 名		中国電力株式会社 島根原子力発電所 1号機 (電気出力460MW)	東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 4号機 (電気出力784MW)	東京電力株式会社 福島第二原子力発電所 2号機 (電気出力1,100MW)
再循環ポンプ		輸入品	輸入品	国産品
再循環ポンプ 駆動用電動機		輸入品	輸入品	日立製
再循環 M G セ ッ ト	駆動用誘導 電動機	日立製	日立製	日立製
	流体継手	日立製	輸入品	日立製
	交流発電機	日立製	日立製	日立製
すくい管駆動装置		輸入品	輸入品	国産品
速度制御装置		輸入品	国産品	日立製

* 日立製作所原子力事業部

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所土浦工場

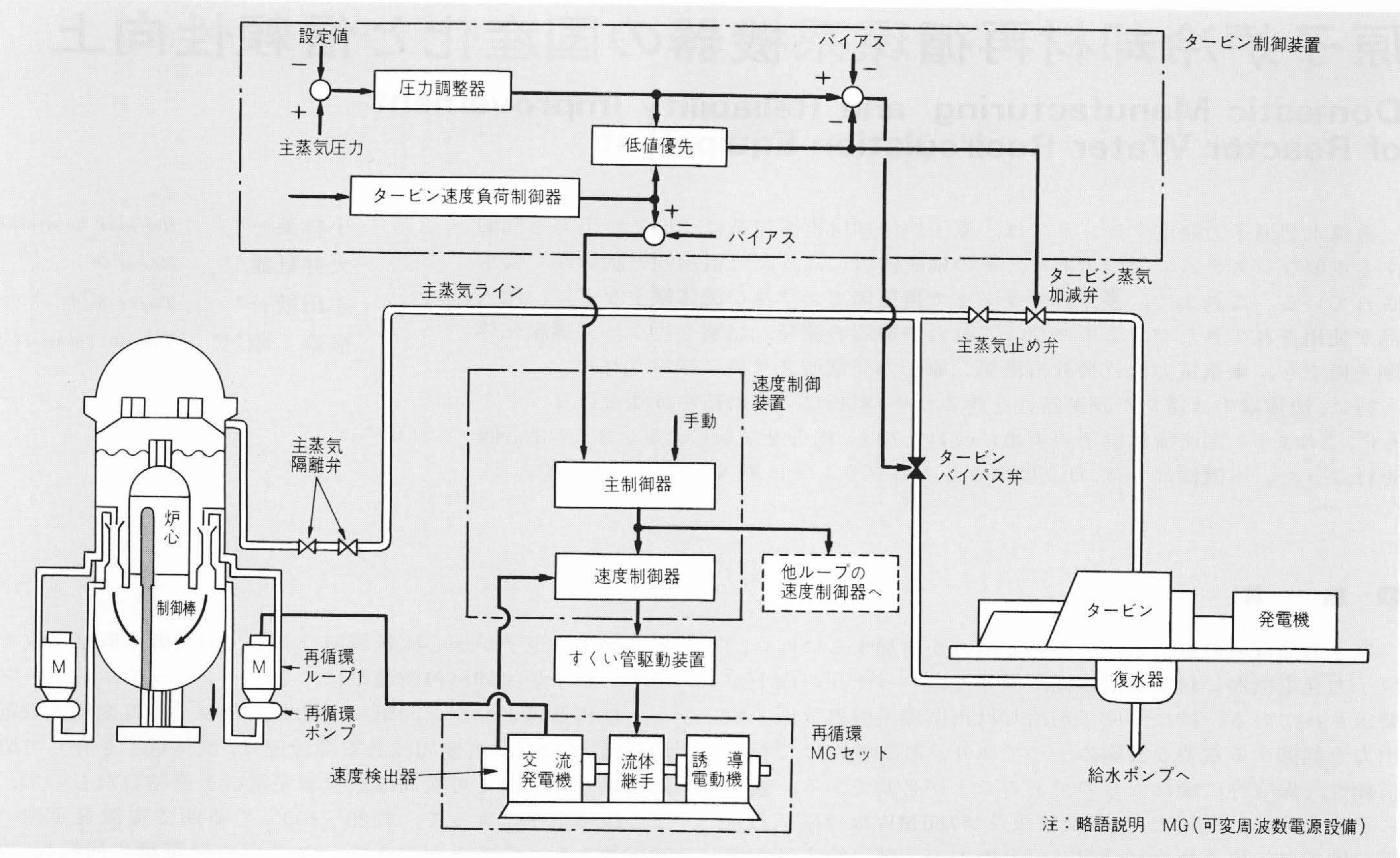


図1 BWRプラントの出力制御系概略構成 BWRプラントの出力制御は、制御棒操作又は再循環ポンプの速度を調節して行なう。再循環ポンプは、可変周波数電源設備を介して、手動又はタービン制御系からの自動信号で速度制御される。

agement Recommendation)に基づき、再循環ポンプの速度制御による定格出力までの上昇過程で、定常時の速度変動による原子炉出力(燃料の線出力密度)変化を±0.1kW/ft以内に抑える。このため、再循環ポンプの速度変動幅を定格の±1.0%以内とする。

4 原子炉冷却材再循環系機器の開発

4.1 機器仕様

再循環ポンプは、定格の102%速度で連続運転が可能であることを前提として、各機器の容量を決定した。表2に機器仕様を示す。

4.2 機器の慣性モーメント検討

原子力発電プラントの容量の増大に伴う原子炉冷却材再循環系機器の容量増加、及びRPT(Recirculation Pump Trip)システム^{※2)}の採用によって、再循環ポンプと電動機の慣性モーメントが増大したため、即応性の観点から詳細な評価が必要である。このため、系統構成機器の特性を模擬した動特性解析コードを開発し、システムの応答特性を定量的に評価した。この解析コードは、電気機器の電圧方程式、トルク方程式及び運動方程式を時間領域で解いている。また、流体継手内の油の流動特性をモデル化し、速度変化時の伝達トルクを精度良く求められるようにした。即応性の評価は、図2に示

表2 原子炉冷却材再循環系機器の主な仕様 再循環ポンプの基本仕様に基づき、同駆動電動機及び可変周波数電源設備の仕様を決定している。

機 器 名		項 目	仕 様
再循環ポンプ		吐 出 し 量	160.5m ³ /min
		揚 程	231.6m
		軸 動 力	5,320kW
		回 転 数	1,395rpm
ポンプ駆動用電動機		出 力	5,770kW
		電 圧	6,740V
		周 波 数	48Hz
再循環MGセット	交流発電機	出 力	7,160kVA
		力 率	0.85
		電 圧	6,740V
		周 波 数	48Hz
	流体継手	出 力	6,400kW
		入力軸速度	990rpm
		出力軸速度	960rpm
	誘導電動機	出 力	7,280kW
		回 転 数	990rpm
		電 圧	6,600V

すようにステップ状の速度要求に対する不感時間と応答時間の和で評価した。解析結果を図3に慣性モーメントと即応性の相対関係として示す。解析結果から、約10%の慣性モーメント減少に対して、約2%の即応性が改善できる程度であることが分かる。すなわち、慣性モーメントは、即応性に大き

※2) RPT(Recirculation Pump Trip)は、プラント過渡時の燃料の熱的健全性維持を目的として採用されたもので、再循環ポンプと電動機の慣性等価時定数が約5秒となるように設計されている。

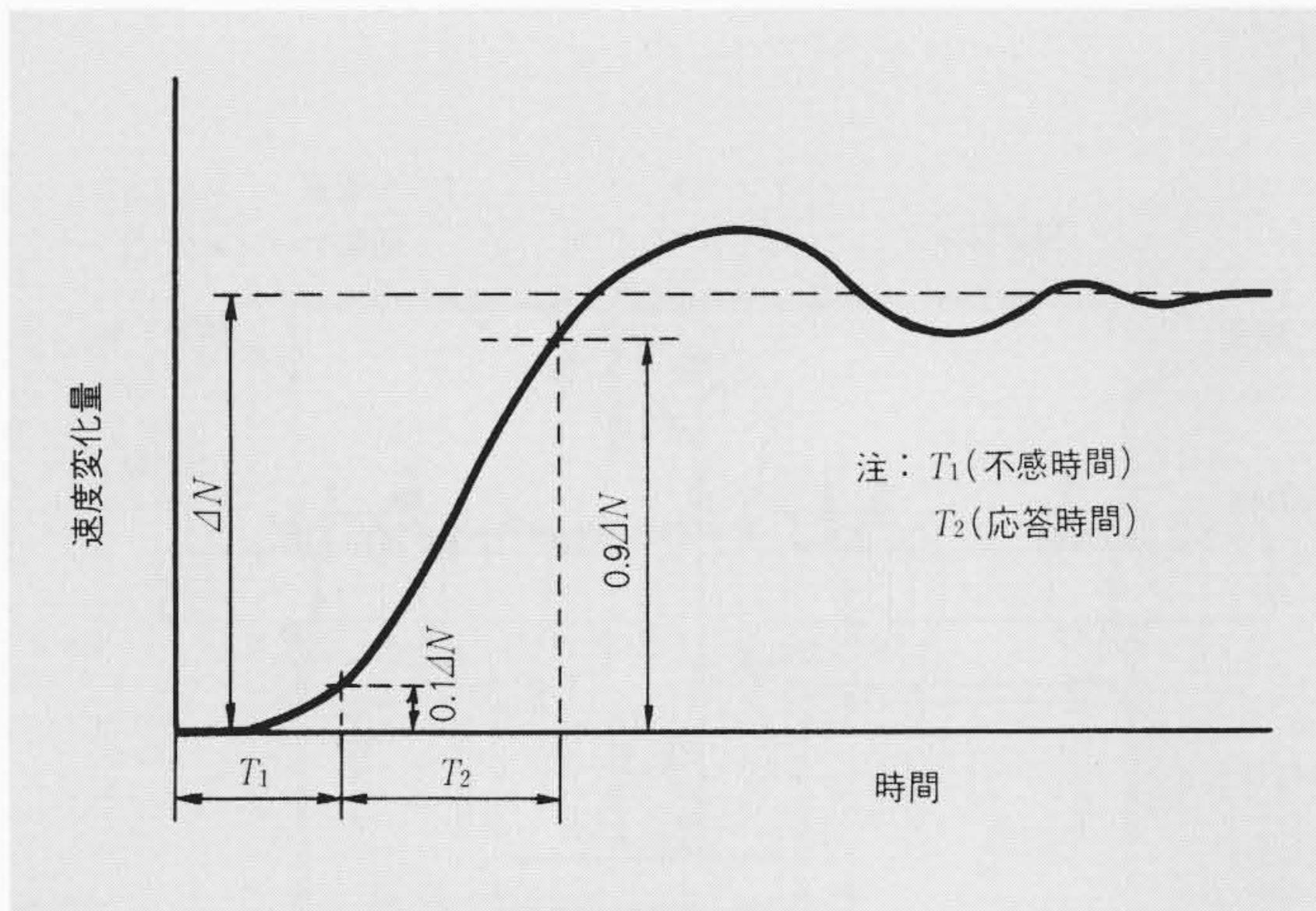


図2 不感時間と応答時間の定義 ステップ状の速度要求信号に対する速度応答に対して、不感時間(T_1)、応答時間(T_2)を図のように定義する。 T_1 、 T_2 が短いほど即応性が良いと判定できる。

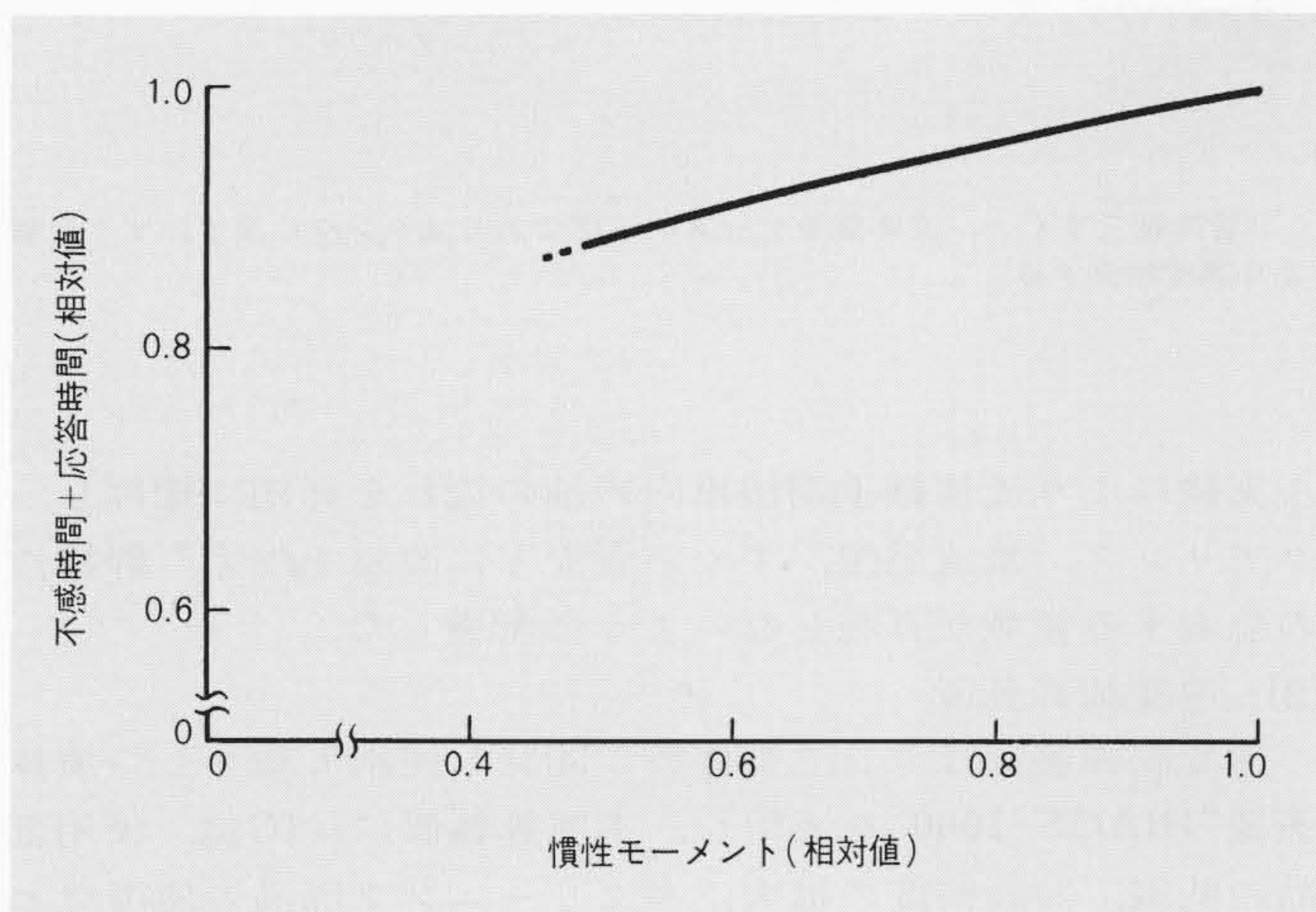


図3 原子炉冷却材再循環系機器の慣性モーメントと即応性の相対関係 再循環ポンプ駆動用電動機や交流発電機の慣性モーメントを、約10%減少させても即応性(不感時間+応答時間)は約2%改善する程度である。すなわち、慣性モーメントの多少の増加は即応性に大きな影響を与えない。

な影響を与えないことを示している。したがって機器の設計に当たっては、信頼性が高く、かつ十分な実績のある従来の設計手法を採用した。

4.3 機器設計上の特徴

4.3.1 再循環ポンプ及び駆動用電動機

再循環ポンプ及び駆動用電動機の構造を図4に示す。これらの機器は、従来は輸入品であったが、一貫した品質管理と保守性向上のため、国内ポンプメーカーの協力を得てこれらの機器を国産化した。再循環ポンプは、立軸単段渦巻形で、耐圧部を構成するケーシング、ケーシングカバーに耐応力腐食割れ性の優れた低炭素ステンレス鋼を使用するとともに、通商産業省告示「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」に合致する設計、徹底した品質管理などによって信頼性の確保に努力した。回転体は、カップリングにより電動機と結合されているが、定期検査時に行なうシール部の交換作業が、従来よりも容易になるように、カップリングフランジの数を減らす構造改善が図られている。

再循環ポンプ駆動用電動機は、原子炉格納容器内でポンプから取り外し、横倒し搬出とつり起こし作業ができる構造と

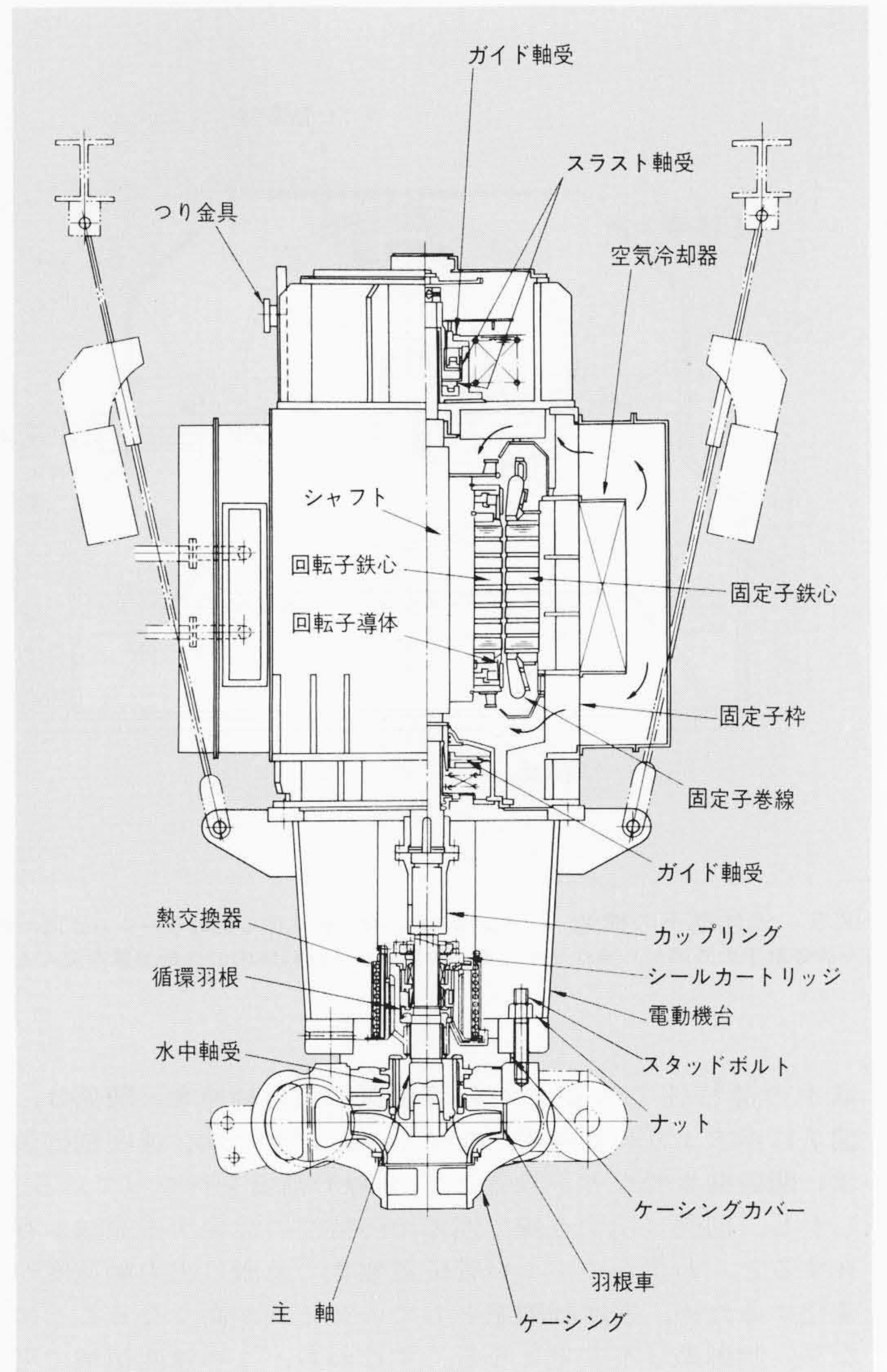


図4 再循環ポンプ及び駆動用電動機の構造 全高6.3m、重量55tに及ぶ立軸一体結合構造で、ポンプ接続配管の熱移動に追従できるように、つり下げ支持されている。

なっている。原子炉格納容器内の放射線量は、本電動機付近で40年間の集積放射線量が約 10^7 radとなるが、これに対しても絶縁性能の点で優れた耐放射線性の材料で構成し、耐湿性にも優れたF種エポキシ絶縁を採用した。その他、巻線素線のサイズをアップすることにより発生損失を低減して、巻線温度上昇をB種並みに抑えけるとともに、厚みを厚くして絶縁の高信頼性を確保した。

4.3.2 可変周波数電源設備

可変周波数電源設備は、交流発電機、駆動用誘導電動機、流体継手と付属のオイルユニット及び速度制御装置から構成される。交流発電機、駆動用誘導電動機は、従来から日立製が使用され、十分な実績をもっている。以下、日立製作所で国産化体制を確立した流体継手と速度制御装置について述べる。

(1) 流体継手

流体継手の構造は、図5に示すように2個の直線放射状の羽根車(インペラとランナ)を組み合わせた油を媒体とした変速機である。流体継手は、再循環ポンプの速度制御上、特に重要な機器で、大容量化に対処するため実機大の流体継手を先行試作し、あらかじめ各種の特性確認試験を行なった。図6に製作した流体継手内の回転体の外観を示す。一般に流体

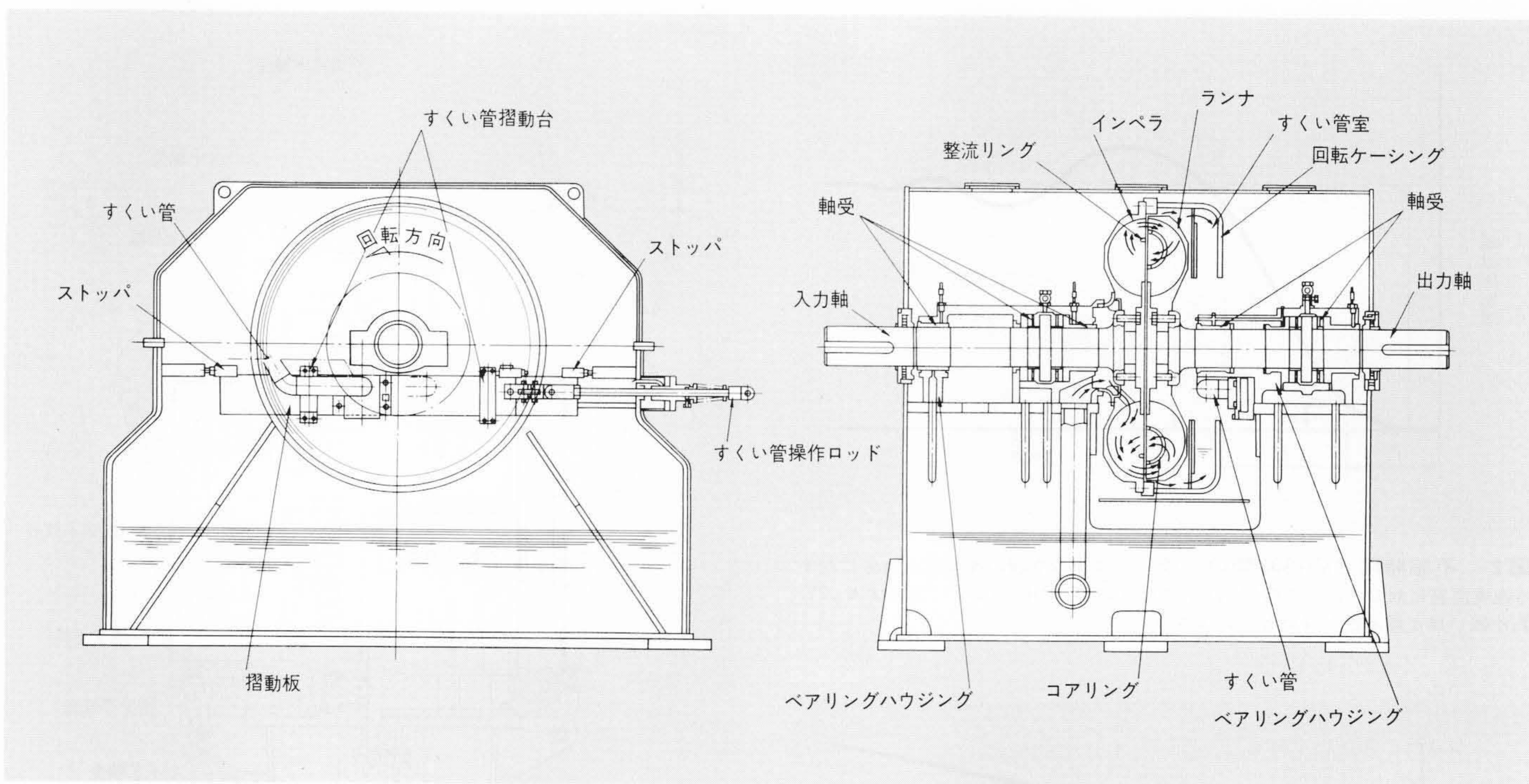


図5 流体継手の構造 インペラと一体で回転する回転ケーシング内の油をすくい管先端ですくい、流体継手ケースの下部にある油タンクに戻す。すくい管を流体継手の外部から操作して、その位置を変え回転体内の作動油量を変えることにより速度制御する。

継手の静特性であるすくい管位置と出力軸速度の関係は、図7に示すように非線形となっている。このため、速度制御装置に関数発生器などを設置して、非線形補償を行なっている。しかし、同図に示す点線で囲んだ静特性の急変する領域が存在すると、わずかのすくい管位置変化で急激に出力軸速度が変化するため、速度制御系としてのゲインが高くなることになり、制御系は不安定となる。すなわち、この速度領域で可変周波数電源設備の出力軸は、周期的な速度変動を生ずる。これは流体継手内の油の流れのパターンが変化すること起因している。原子力用流体継手は、速度変動を非常に小さく抑える必要があることから、日立製作所ではあらかじめモデ

ル実験により流体継手羽根車内の油の流れを詳細に把握し、コアリング、整流羽根、すくい管などに改良を加え、静特性の急変する領域が存在しないように配慮した。

(2) 速度制御装置

速度制御装置は、日立製作所が開発し使用実績をもつ演算装置“HIACS-1000”を適用し、本演算装置にはIC化、使用部品の低減、設計裕度の拡大、スクリーニング部品の使用などによって、従来の一般プロセス計器に比べ、ハードウェア固有の信頼性をより向上させている。図8に演算装置の外観を示す。また、演算信号レベル拡大による設定精度、演算精度の向上(従来比2倍)及び25種の演算機能によって運転操作性

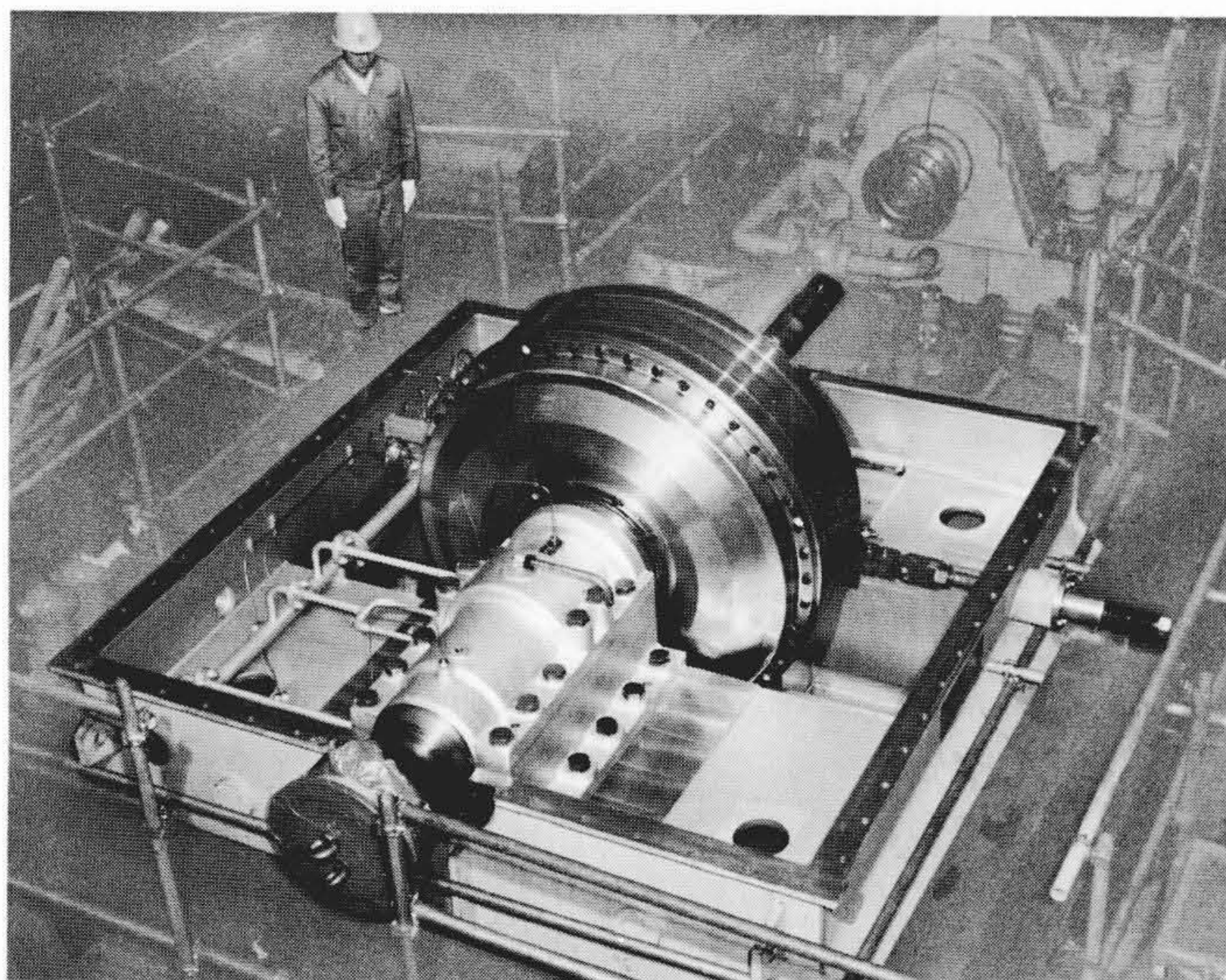


図6 流体継手のロータ(インペラとランナ)外観 本図は、流体継手の回転体であるインペラ(入力軸)とランナ(出力軸)がカップリングされた状態を示す。手前がインペラで、ケーシングカバーを外した状態である。

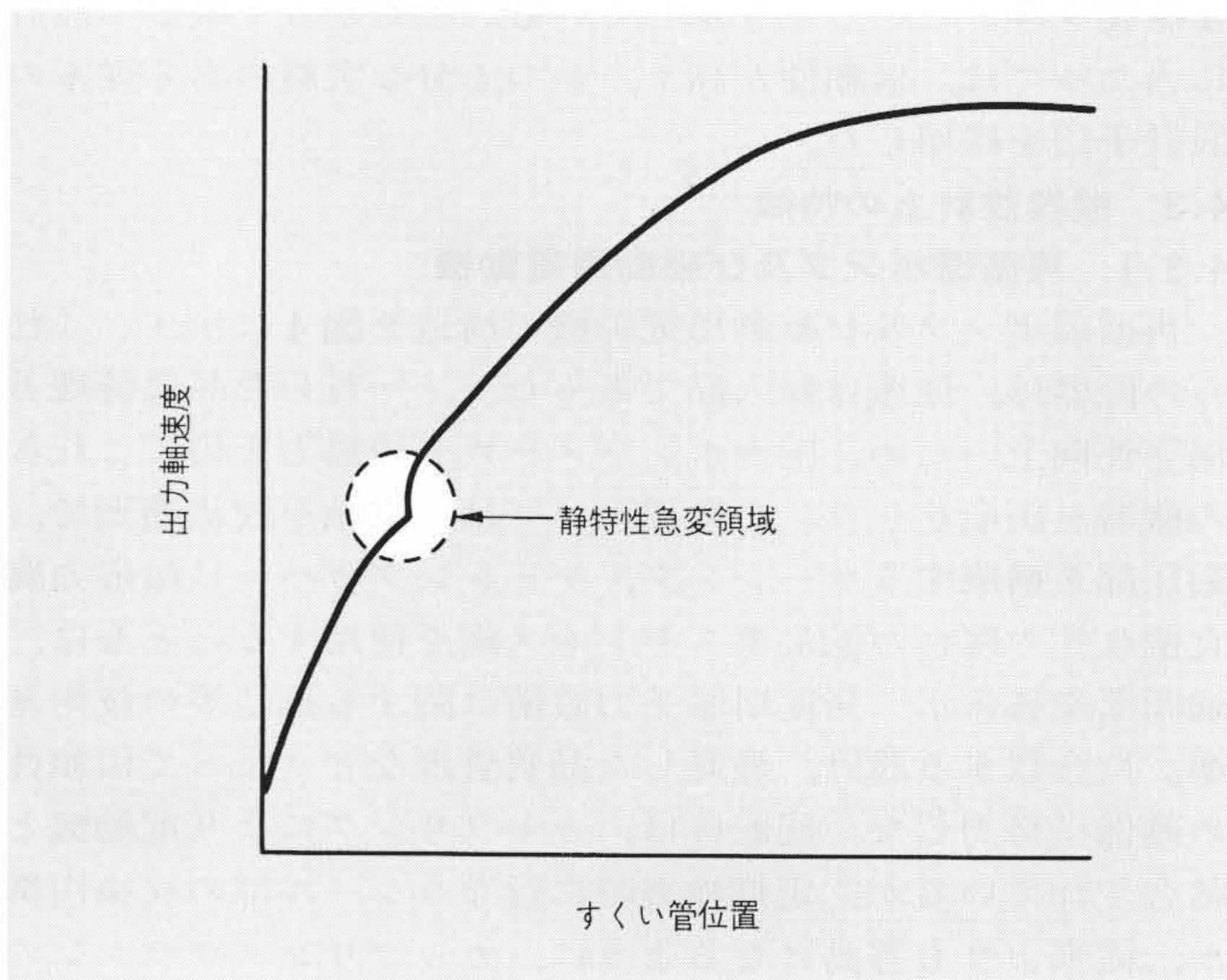


図7 流体継手の静特性 流体継手のすくい管位置に対する出力軸速度の関係は、一般に本図に示すような特性で表わされる。

表3 水抵抗負荷による試験結果 いずれの試験項目についても、仕様値をすべて満足する結果を得ている。

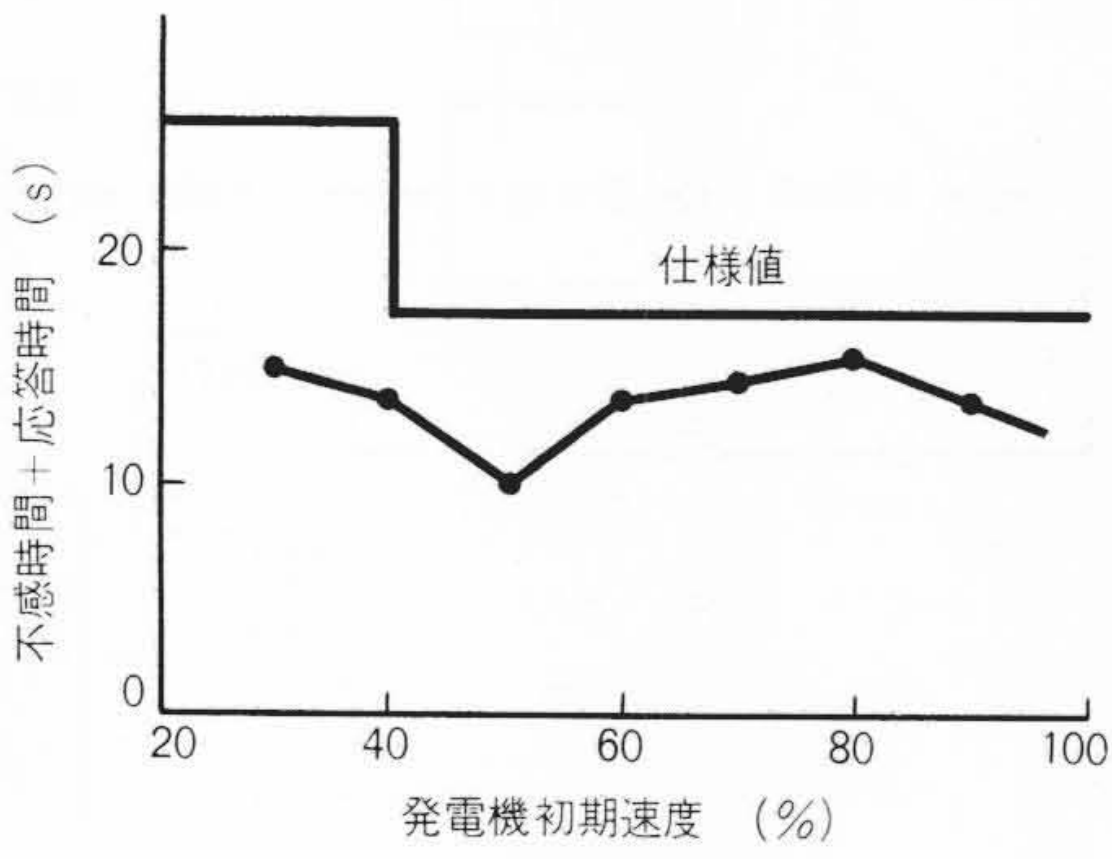
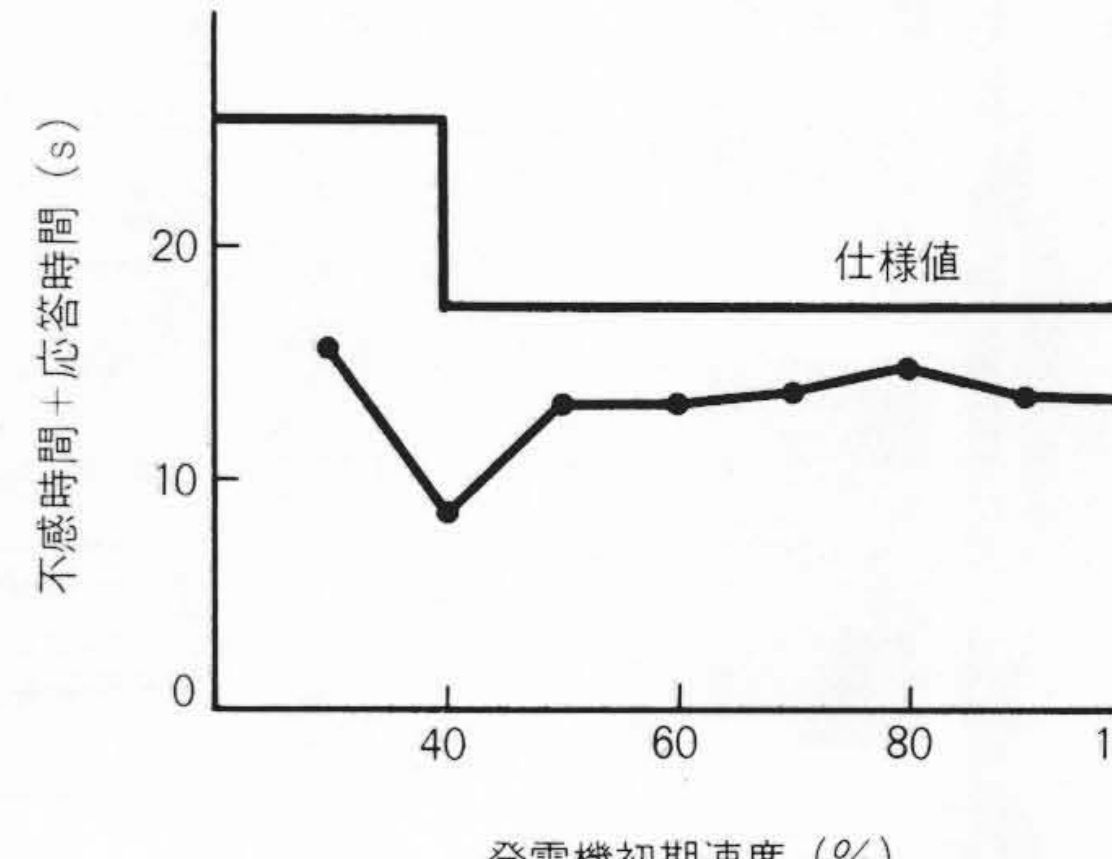
試験項目	試験結果
静特性試験	全速度領域にわたって静特性急変領域なし。
速度安定性試験	速度変動最大値±0.41% (仕様値±1.0%以内)
速度応答性試験 (5%のステップ状速度変化要求に対する応答)	

表4 再循環ポンプ負荷による試験結果 速度安定性及び速度応答性ともに水抵抗負荷試験とほぼ同様の結果を示し、すべて仕様値を満足している。

試験項目	試験結果
静特性試験	全速度領域にわたって静特性急変領域なし。
速度安定性試験	速度変動最大値±0.41% (仕様値±1.0%以内)
速度応答性試験 (5%のステップ状速度変化要求に対する応答)	

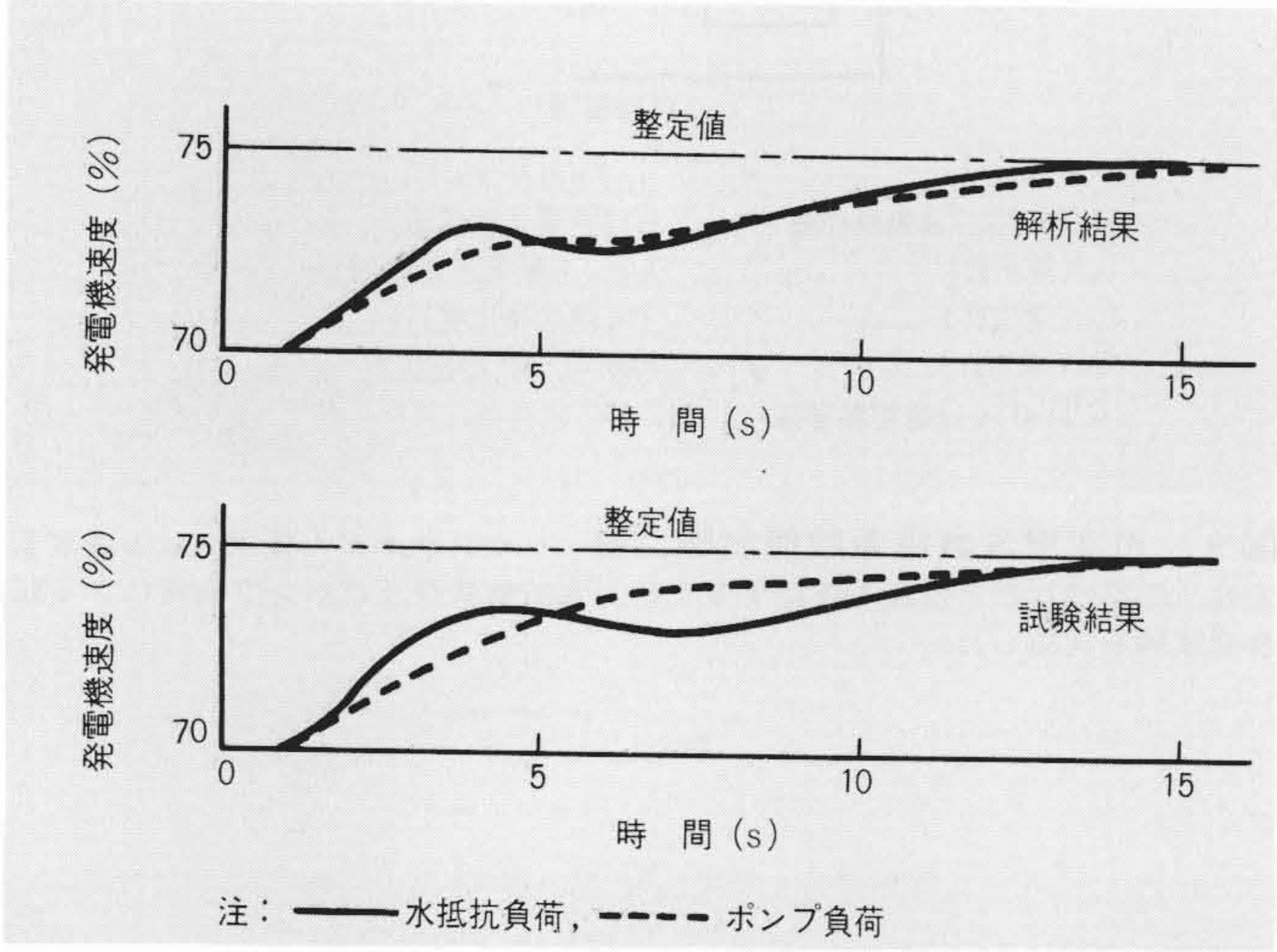


図11 水抵抗負荷と再循環ポンプ負荷の速度応答性試験結果比較
試験結果と解析結果は、同様の傾向を示している。速度応答性の評価は、水抵抗負荷で可能であることが分かる。

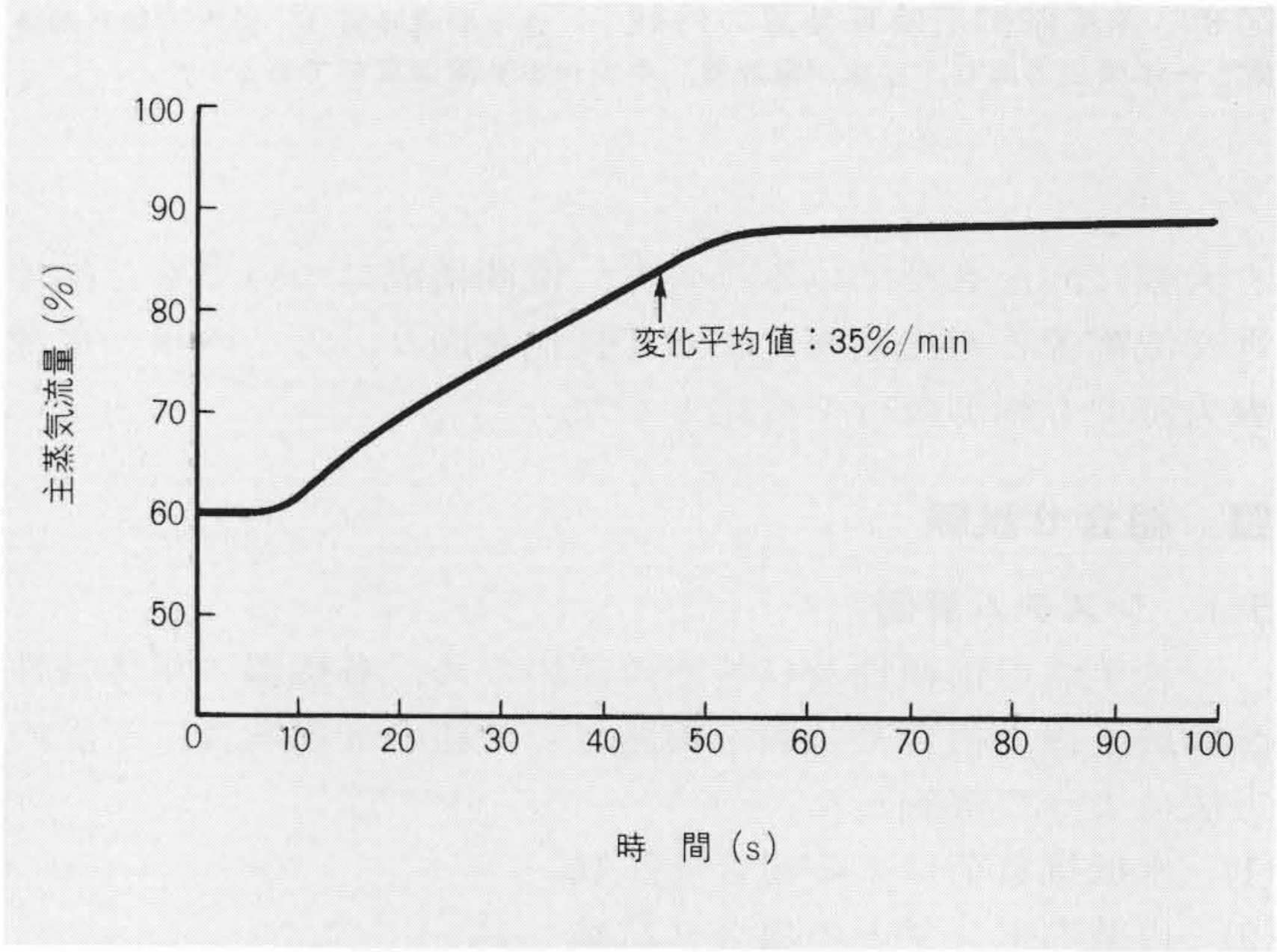


図12 プラントの出力変更解析結果 再循環系機器の組合せ試験結果から得たデータに基づき、プラントの出力変更時の予想解析を行なった結果、出力変化率30%/分を満足できることを確認できた。

比較した一例である。水抵抗負荷とポンプ負荷では、その慣性が異なるため、初期応答に差はみられるものの応答時間に大きな差は生じていない。これは、速度フィードバックによる効果で、あらかじめ解析で求めた結果とよく一致している。このことから可変周波数電源装置の性能は、動特性解析と水抵抗負荷試験で十分評価可能であることが分かる。また、長時間信頼性確認試験では、500時間の長時間運転を実施し、軸受温度、冷却水温度、振動などに異常がないこと、機器の分解検査で摩耗や損傷などの異常がないことなどを確認した。

5.2 プラント適用時の評価

得られた試験データに基づき、本系統機器を実機プラントへ適用した場合について解析評価した。その結果、図12に示すように、30%/分の原子炉出力変化率を達成できることが確認された。このように、機器の単体、再循環MG(可変周波数電源設備)セットの組合せ及びポンプと再循環MGセットとの総合組合せによる一貫した試験の実施と解析評価によ

り、機器及びシステムのよりいっそうの信頼性向上を図ることができ、日立製作所での国産化体制を確立できた。

6 結 言

以上、原子炉冷却材再循環系機器を国産化するに当たっての設計、製作及び試験経過並びに機器及び組合せ試験結果の特徴について述べた。本機器は今後、各プラントへ適用されていく予定である。

最後に、本システムを確立するに当たり、御指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

1) 川村, 外: 再循環ポンプ用可変周波数電源MGセット, 日立評論, 53, 11, 1107~1111(昭46-11)