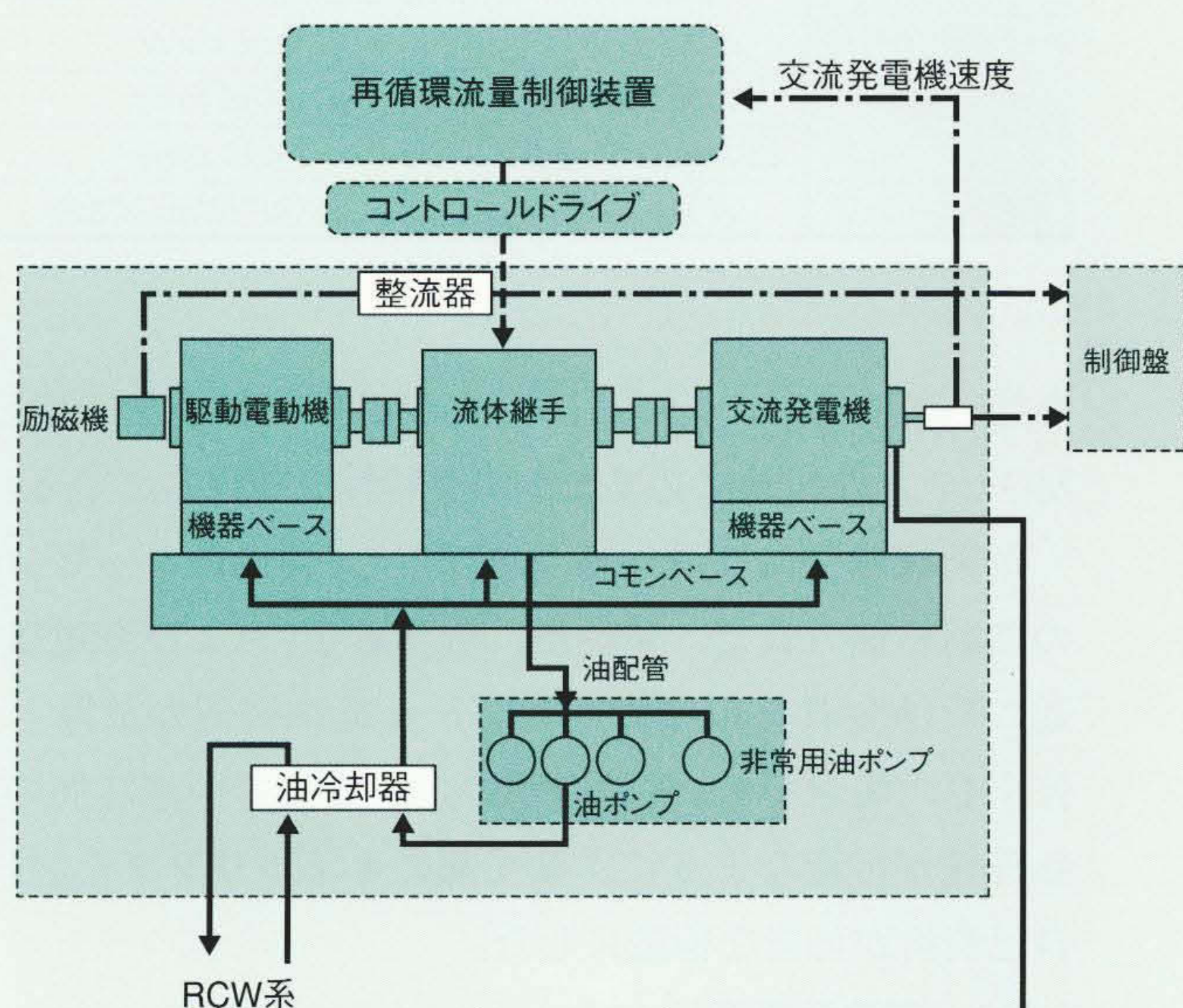


—東京電力株式会社福島第一原子力発電所1号機—

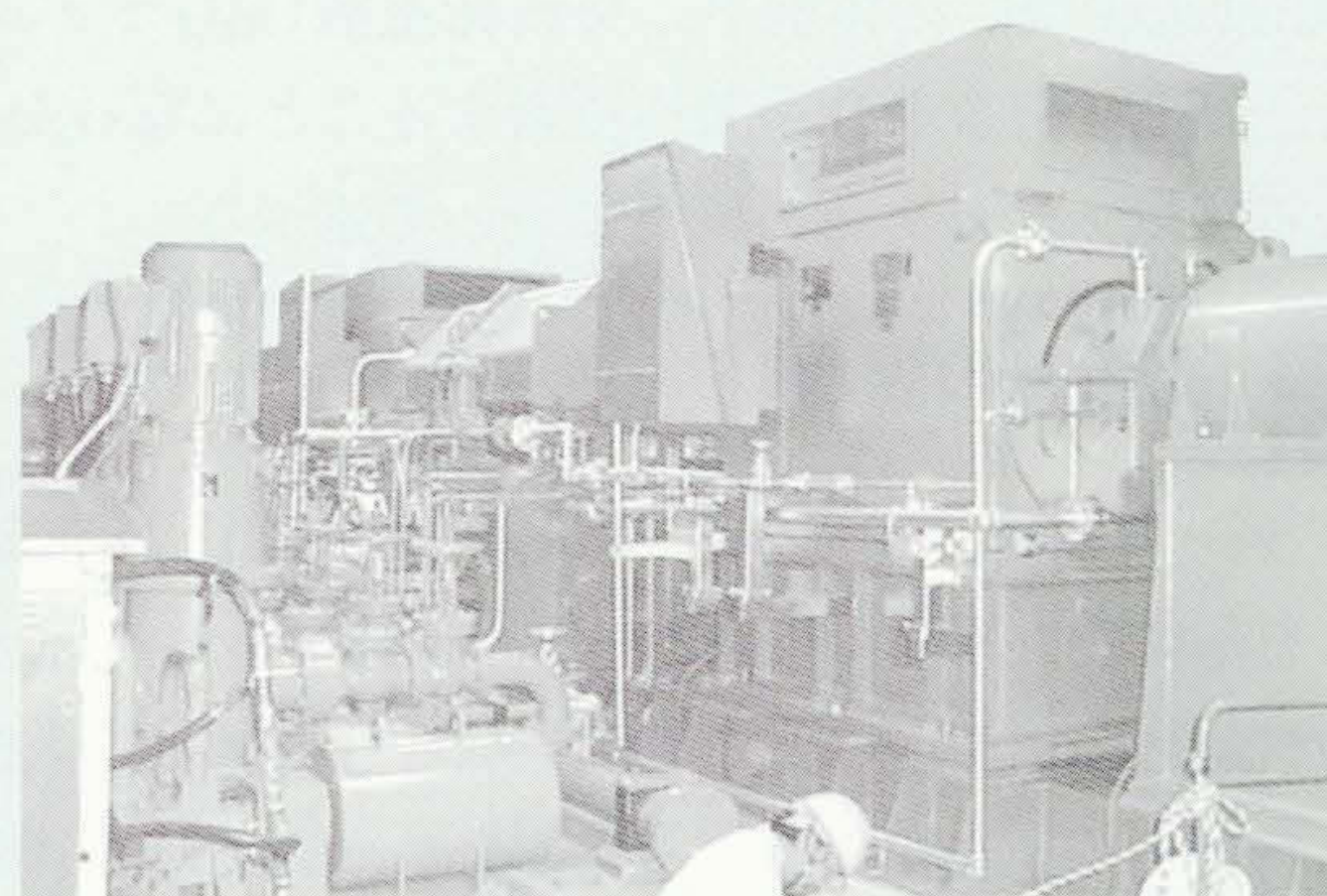
Replacement of the Power Supply Devices for Nuclear Reactor Recirculation Pumps

水本文夫 *Fumio Mizuki*

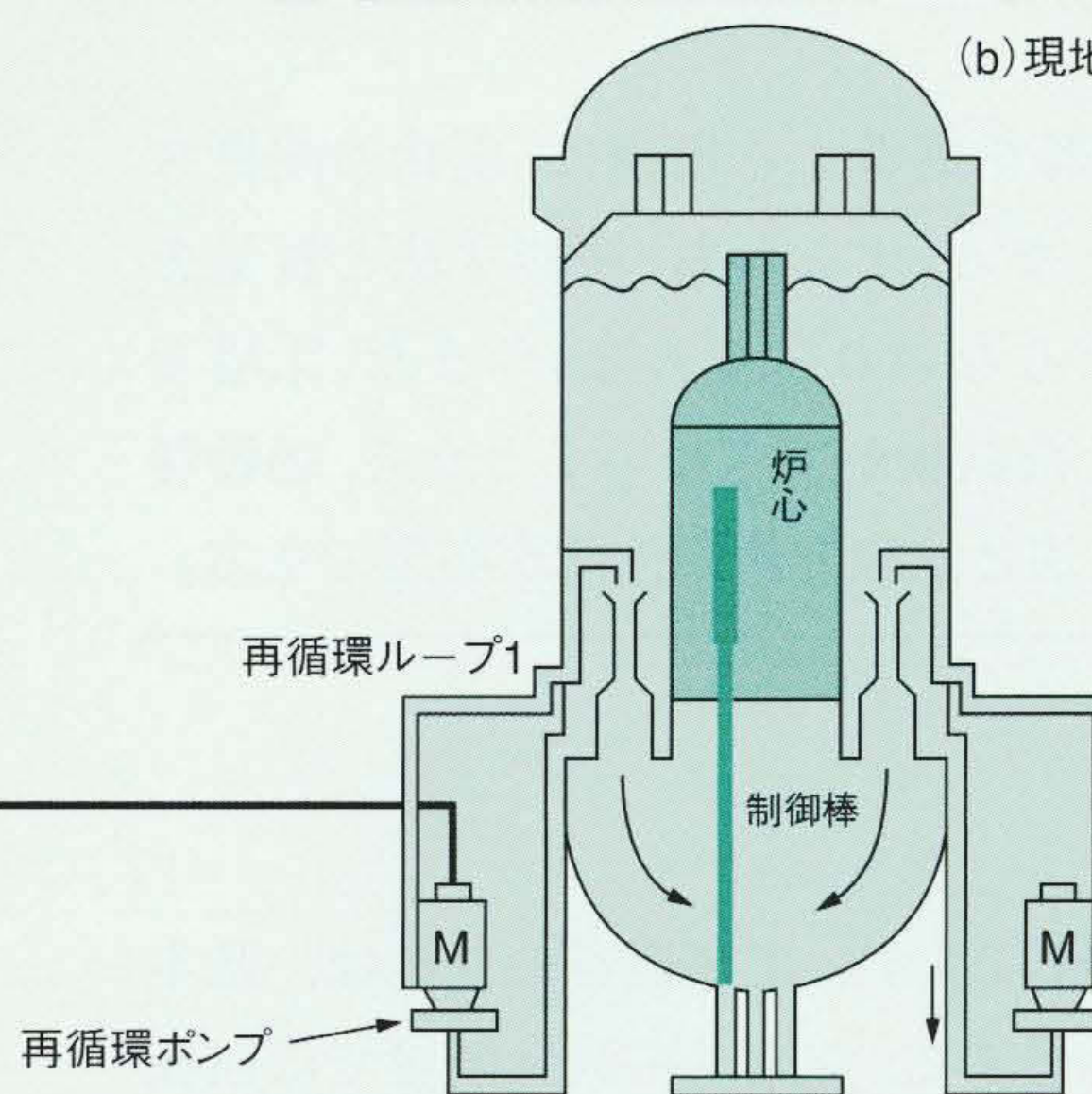
間野正博 Masahiro Mano

関谷憲司 *Kenji Sekiya*桐山和久 *Kazuhisa Kiriyama*高橋建夫 *Takeo Takahashi*

(a)「可変周波数電源装置」の更新範囲



(b) 現地据付け完了後の外観



注1: (更新範圍)

注2：略語説明 RCW(Reactor Coolant Water)，M(Motor)

再循環ポンプ用可変周波数電源装置の更新範囲(a)と据付け完了後の外観(b)

更新範囲は、主要機器(駆動電動機、流体継手、交流発電機、コモンベース)、油装置(油ポンプ、油冷却器)、および付帯制御設備である。

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、および保守性が要求される。

運転開始後約30年が経過した東京電力株式会社福島第一原子力発電所1号機の更新該当設備はすべて輸入品であり、日立製作所は、それらの保守を担当してきた。このたび、東京電力株式会社から、これらの主要機器、油装置、および付帯設備の一括更新を受注し、据付けを完了した。

原子力発電プラントでのこのような設備の更新は、わが国で初めてのことである。更新にあたっては、配置スペースや搬入など建設時とは異なるさまざまな制約があった。これに対して、これまでの保守の実績を基に、保守性を考慮した設計上の工夫を凝らした。

機器の更新では、実負荷を用いた事前組合せ試験ができないことから、更新後の電源装置の起動特性を得るために解析コードを開発し、動特性評価を行った。また、実負荷を模擬する金属抵抗器を製作し、工場での組合せ試験の精度を向上させた。

更新機の制御特性は良好であり、更新後もプラントは安定運転を継続している。

1 はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所1号機は、運転開始後約30年が経過する。この保守を担当してきた日立製作所は、最近の機器点検で、絶縁劣化の兆候を発見した。運転上の支障はないものの、今後安定運転を継続していくうえでのいっそうの高信頼性を確保するために、駆動電動機、流体継手、交流発電機(MGセット)などを一括して日立製作所製へ更新することになった。

ここでは、この更新の概要について述べる。

2 更新時の課題

プラントの建設では、まず機器の概略寸法が決まり、それを基に配置や建屋のスペースが決定される。したがって、機器設計に関して特に制約となるものはない。また、実負荷である再循環ポンプと組み合わせた工場での試験も可能である。

一方、これらの機器を更新する場合は、現状の配置スペースが設計条件となる。すなわち、機器寸法と質量を既設のものと同等としなければならない。また、工場で実負荷と組み合わせた試験ができないことから、起動特性などの事前評価方法と試験方法の検討が必要である。

3 機器設計

3.1 機器仕様

主な機器仕様を表1に示す。主要機器の仕様は、基本的に既設機器と同等である。交流励磁機は既設では回転整流型であったものを、日立製作所が設計した別置き型とした。また、常用油ポンプを、50%容量3台の構成(1台予備)とした。

3.2 機器設計上の特徴

3.2.1 駆動電動機

駆動電動機は、横軸開放防滴特殊かご形三相誘導電動機である。既設機と冷却方式を合わせた開放防滴形を採用しており、周囲の空気を電動機上部に設置した通風箱を通して電動機内部に出入りさせ、電動機を冷却する構造である。通常に比べて天井がやや低いため、保守スペースを確保する観点から、通風箱の高さを極力小さくした特殊設計としている。

ステータコイルには、真空遮断器から発生するサージ電圧に耐えられるエナメル被覆ガラス巻電線を採用した。また、絶縁にはコイルと一体でエポキシ樹脂を注入するF種絶縁を採用し、床振動低減対策として小型・軽量化

表1 更新機器の主な仕様

交流励磁機を回転整流型から別置き型に変更したほか、100%容量2台であった常用油ポンプを50%容量3台(1台予備)に変更した。

機 器	項 目	仕 様
駆動電動機	定格出力	2,611 kW
	定格電圧	6,600 V
	定格速度	1,485 r/min
交流発電機	定格出力	2,197 kW
	定格速度	1,440 r/min
交流励磁機	定格出力	17.2 kW
	励磁方式	別置き整流装置と交流励磁機
流体継手	定格出力	2,294 kW
	入力軸定格速度	1,485 r/min
	出力軸定格速度	1,410 r/min
常用油ポンプ	容量・台数	50%(48 m³/h)×3台

を図っている。ロータには二重かご形回転子を採用し、MGセットの起動に必要なトルク特性を確保している。

電動機軸受には滑り軸受を採用し、潤滑はタービン油の強制給油方式で、電動機、流体継手、および発電機共通の給油装置を用いている。万一、給油装置が故障して停止した場合でも、電動機が停止するまでの短時間の運転継続が可能のように、軸受部にオイルリングを設け、自己潤滑が可能な構造にした。

3.2.2 交流発電機

交流発電機は、開放空冷回転界磁突極形三相同期発電機である(表1参照)。

発電機の運転速度は、定格回転速度の約20%から100%の範囲で連続的に変化する。そのため、この速度の範囲内で機械力と電磁力に十分耐えられるように、ロータとステータともに剛性を確保している。

極数が4極の高速機となることから、大きな回転慣性要求値を満足するために、ロータを大型化してある。

ステータコイルと界磁コイルにはともにF種絶縁を採用し、その温度上昇限度をB種絶縁相当の温度に設定することにより、長寿命化を図った。界磁コイルは平形銅線をエッジ方向に巻き、コイルと磁極間には絶縁板およびシール材を配置し、冷却効率と絶縁抵抗の低下防止に配慮した。

発電機軸受にはオイルリングを設けて自己潤滑も可能とし、コンパクトな構造にしている。

発電機の励磁装置には、交流励磁機と別置整流装置を用いている。交流励磁機は回転界磁形であり、駆動電動機に直結されている。この励磁方式はこれまでに、東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機、同福島第二原子力発電所2号機および4号機など、MGセットで多数

の実績がある。

交流励磁機の励磁装置には既設品を使用するので、交流励磁機と交流発電機の界磁コイル仕様の検討を行い、既設の励磁装置仕様に合わせる設計を行った。

3.2.3 流体継手

MGセットでは、炉心流量の制御を行うことから、回転速度変動を起こすと、原子炉内の中性子束も変動する。したがって、流体継手では、負荷が一定の状態では出力回転速度が安定していることが必要であり、また、回転速度を、約20～100%の広範囲で無段階に制御する必要がある。

日立製作所は、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機で、速度変動が小さく、連続的に速度制御できる流体継手を開発した。この開発に際しては、流体継手の内部流れの解明と速度変動量の分布を把握し、すべての運転範囲で速度変動が大きくなる領域が存在しないように、流体回路形状を設計している。

この流体継手の流体回路形状は、流体力学的に開発機と相似形にした。流体継手の伝達トルクは、回転速度の二乗と羽根車径の五乗に比例する関係にある。駆動電動機は4極で、回転速度が開発機に比べて大きく、伝達トルクも小さい。このため、流体継手の羽根車径が小さくなり、再循環MGセットの慣性を確保しなければならない。これについては、流体継手回転体の外部形状を見直すことによって対応した。

また、保守スペースとしての上部ケースの移動距離が制限されてしまうので、流体継手の上部ケースを入力側

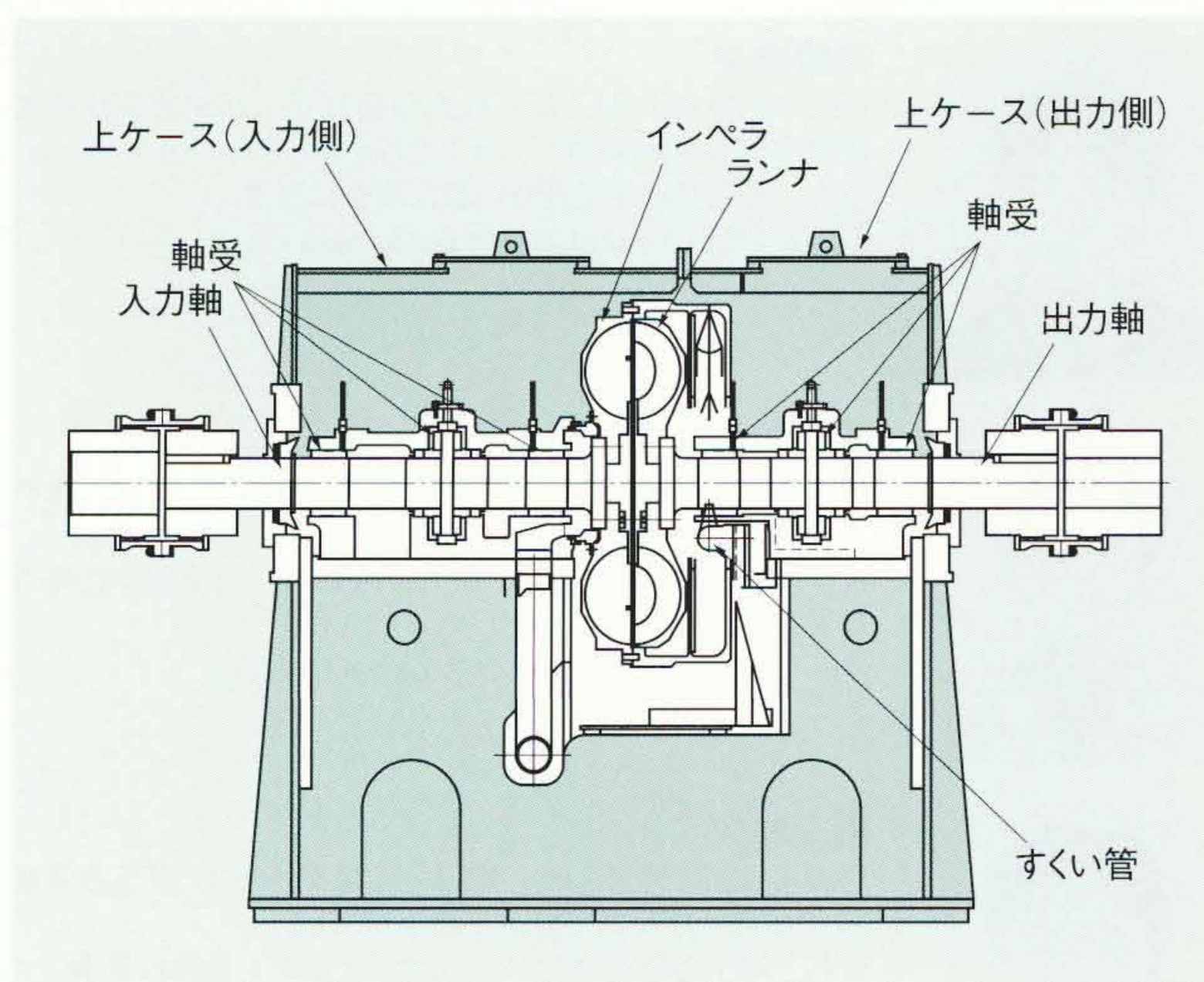


図1 流体継手の概略構造

上ケースを2分割式とすることによって横方向に開放できるようにし、高さ方向での保守性を考慮した。

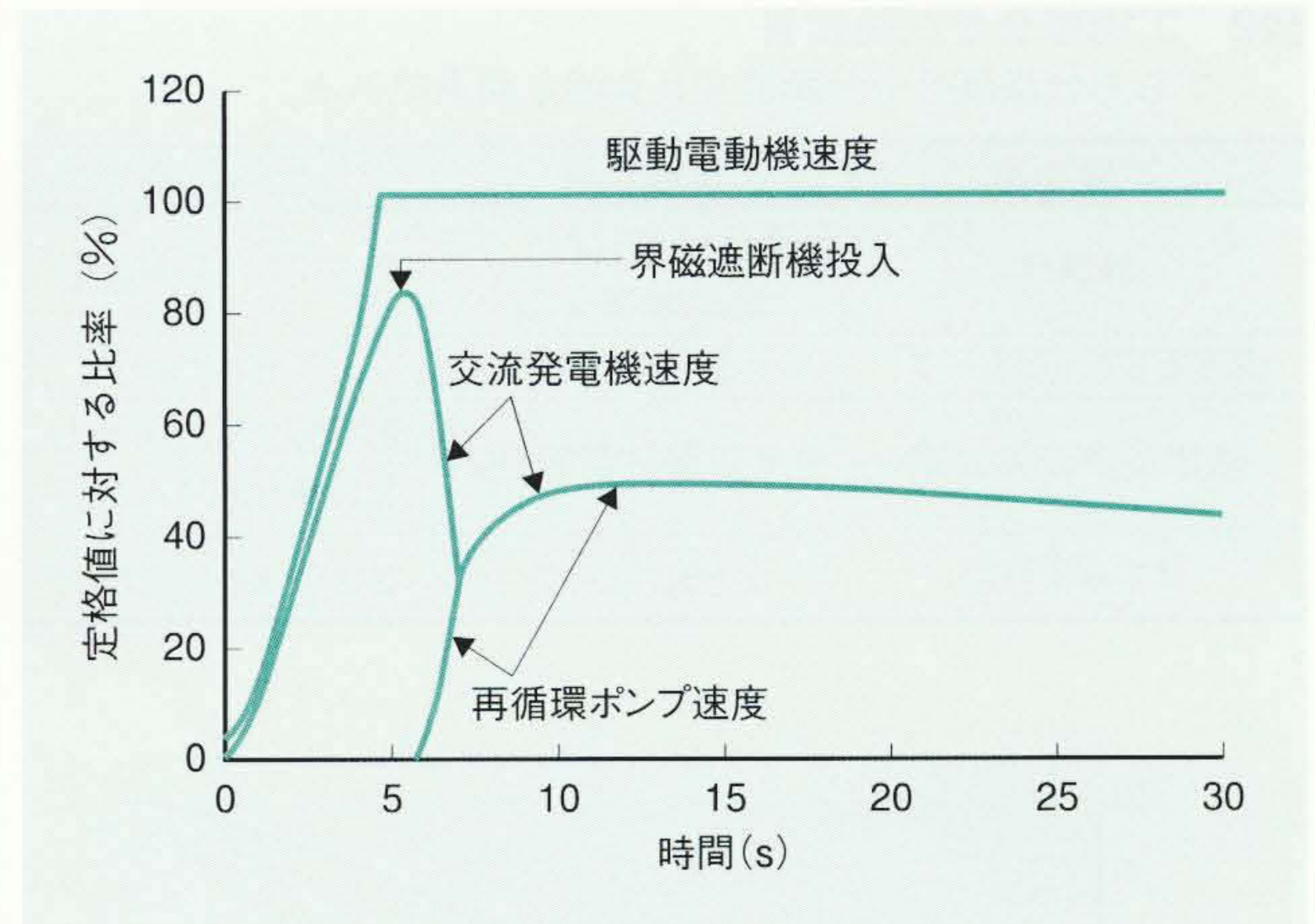


図2 MGセットの起動特性解析結果

新たに開発した詳細解析コードにより、起動特性の評価を行った。

と出力側の2分割構造とした(図1参照)。

潤滑油装置では、100%容量ポンプ2台(1台予備)で構成していたものを50%容量3台(1台予備)構成とし、常用油ポンプ切換時の圧力(流量)変動を最小限に抑える構成にしている。

3.2.4 起動特性評価

MGセットの起動では、まず駆動電動機を起動し、定格速度へ到達した後、交流発電機の界磁遮断機を投入する。界磁遮断機の投入タイミングと、すくい管の初期位置の組合せにより、安定した起動特性が得られる。

今回は、更新後のMGセットの起動特性を評価するため、MGセット用の詳細解析コードを開発した。再循環ポンプ負荷を模擬することで、更新機での起動特性を評価し(図2参照)、界磁投入タイミングと、すくい管初期位置の最適値を決定した。さらに、実機でも安定した起動ができることを確認した。

4 確認試験

4.1 工場での組合せ試験

工場での組合せ試験では、流体継手の静特性の検証を中心に試験を実施した。試験項目と試験結果を表2に示す。全速度領域にわたって急変領域がなく(図3参照)、いずれの試験結果も仕様値を満足していることを確認した。

4.2 現地試験

現地では、再循環流量制御系を含む閉ループを構成し、閉ループでの速度安定性試験と動特性試験を追加した。

閉ループでの速度安定性試験では、速度指令を一定にした状態でのMGセット速度の変動を測定した。仕様値 $\pm 15 \text{ min}^{-1}$ に対して、全速度領域で最大でも $\pm 6 \text{ min}^{-1}$ と

表2 工場組合せ試験結果

いずれも仕様値を十分満足する良好な結果である。

試験項目	試験結果	仕様値
静特性	全速度領域にわたって速度急変なし	急変ポイントなし
速度安定性(開ループ)	$\pm 3 \text{ min}^{-1}$ 以下	$\pm 6 \text{ min}^{-1}$ 以下
油ポンプ切換試験	速度変動許容範囲内	低下幅2%以下かつ上昇率0.5%/s以下
はずみ車測定	2,660 kg-m ²	2,411 kg-m ² 以上

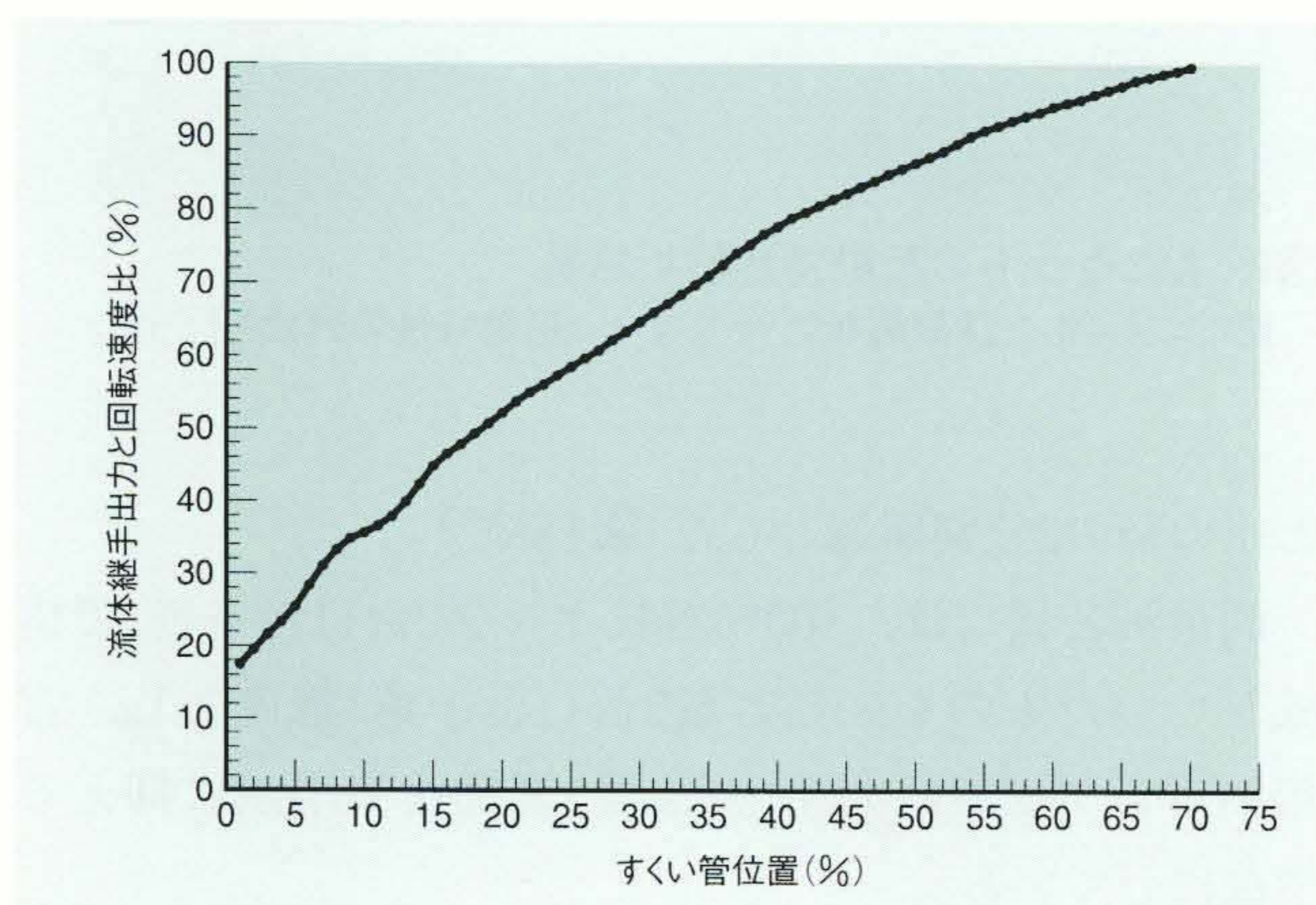


図3 静特性試験結果

速度急変領域のない、安定な特性となっている。

安定した結果を得ている。それ以外の試験結果も工場試験結果と同等であり、良好な特性であることを確認した。

原子炉が停止している状態で、実際の再循環ポンプを起動する再循環ポンプ高速運転試験でも、同様の試験を実施し、システム上、良好な特性であることを確認した。

ステップ応答試験結果の例を図4に示す。不動時間と応答時間についても、仕様値を満たした良好な特性を得た。

このプラントは、更新を行った定期検査後も、定格出力で安定運転を継続している。

5 おわりに

ここでは、東京電力株式会社福島第一原子力発電所1号機のMGセットの更新について述べた。

わが国では複数のMGセットが稼動している。日立製作所は、今後、今回の技術を基にこれらの更新を推進していくとともに、原子力発電プラントのいっそうの安定運転に貢献していく考えである。

終わりに、この更新にあたっては、東京電力株式会社の関係各位から多大なご指導とご協力をいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。

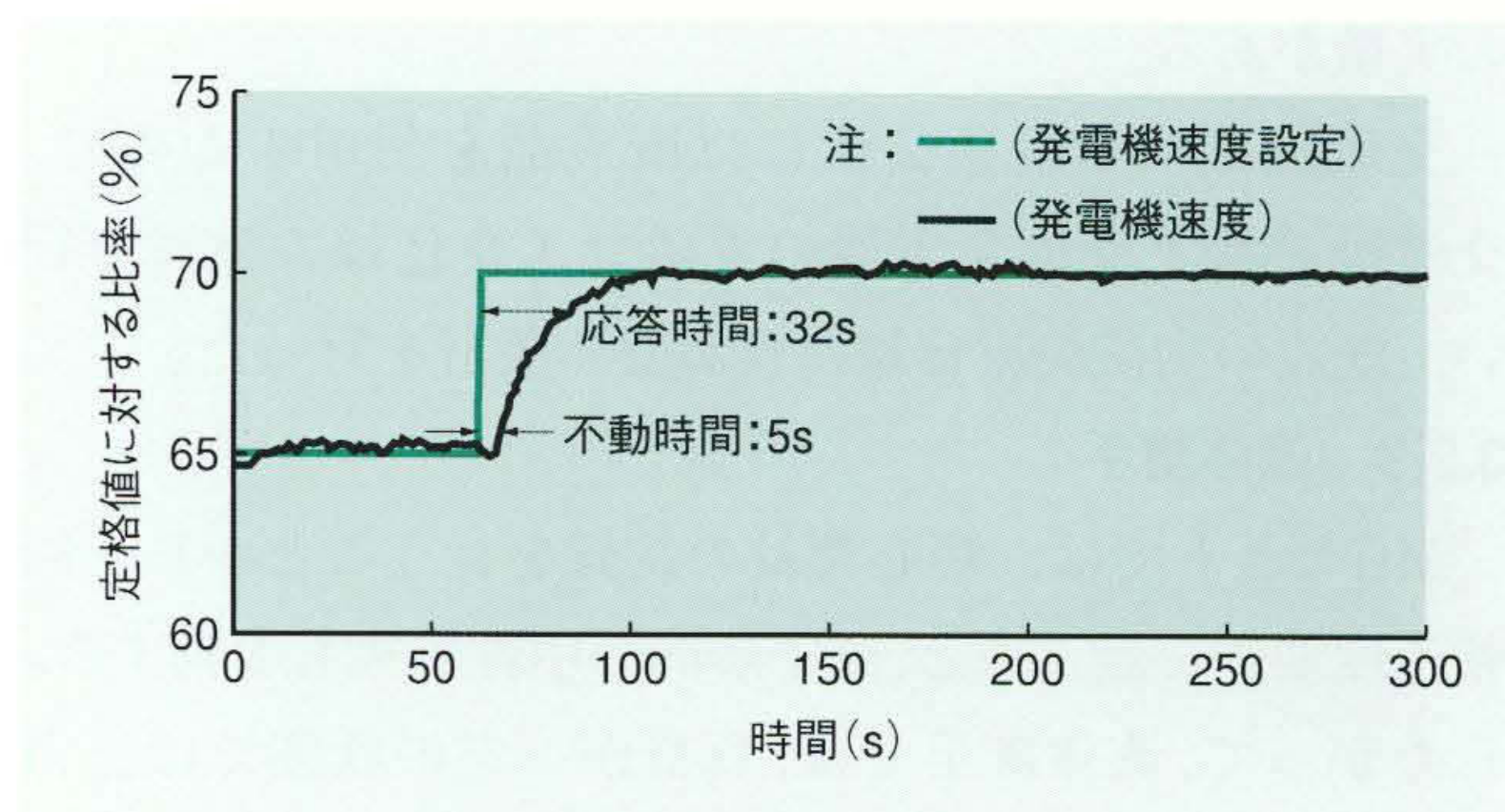


図4 ステップ応答試験結果例

仕様値(不動時間6秒以内、応答時間40秒以内)を満足する良好な結果である。

参考文献

- 1) 戸井田：流体変速機の最近の動向，ターボ機械，19，5，277～283(1991.1)

執筆者紹介



水本文夫

1984年日立製作所入社，電力・電機グループ 原子力事業部 原子力制御計画部 所属
現在，制御システム計画と動特性解析業務に従事
日本原子力学会会員
E-mail：fumio_mizuki @ pis. hitachi. co. jp



関谷憲司

1999年日立製作所入社，電力・電機グループ 電機システム事業部 電力設計部 所属
現在，原子力・火力発電プラント用交流発電機の設計業務に従事
E-mail：kenji_sekiya @ pis. hitachi. co. jp



高橋建夫

1991年日立製作所入社，株式会社日立インダストリイズ 産業機械事業部 精機システム部 所属
現在，産業機械用変速機の設計業務に従事
E-mail：takeo_takahashi @ pis. hitachi. co. jp



間野正博

1996年日立製作所入社，電力・電機グループ 電機システム事業部 電動機システム部 所属
現在，原子力発電プラント用大型電動機の設計業務に従事
電気学会会員
E-mail：masahiro_mano @ pis. hitachi. co. jp



桐山和久

1990年日立製作所入社，電力・電機グループ 原子力事業部 原子力サービスプロジェクト部 所属
現在，原子力発電プラントのプロジェクト業務に従事
E-mail：kazuhisa_kiriyama @ pis. hitachi. co. jp