

# 高効率・高信頼性原子力発電プラントを実現する計装制御技術

Hitachi's Technologies for Instrumentation and Control Systems to Fulfill High-performance and Highly-reliable Nuclear Power Plants

長谷川 真 Shin Hasegawa

杉浦 達人 Tatsuto Sugiura



注:略語説明 ABWR (Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉), LPRM (Local Power Range Monitor:局部領域出力モニタ), A/D (Analog/Digital), APRM (Average Power Range Monitor:平均出力領域モニタ)

図1 原子力発電プラントの計装制御技術の発展

原子力発電プラントの計装制御技術は、デジタル制御技術の進展などを取り込みながら、さらなる信頼性・効率向上をめざし、継続的な発展を遂げている。

原子力発電所の高効率化を目的とし、長期サイクル運転や定格熱出力の向上といった総合的なプラント運用方策が計画されるようになってきた。また、多くのプラントでは機器の劣化更新に伴うリプレースも進んでいる。

新たな運転条件や新旧機器の混在するこのような条件においては、プラント性能を最大限に発揮させた運転状態を安定的かつ信頼性高く継続させるために、機器レベルからプラントレベルまでの広範な状態量を監視し、適切な制御を行うことのできる計装制御システムが必要となる。

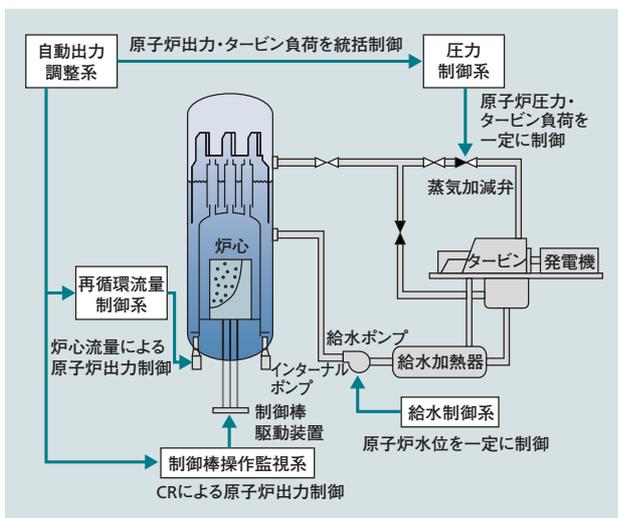
日立は、常に最新のデジタル技術を取り入れ、高効率・高信頼な原子力発電プラントを実現する計装制御技術を開発させている(図1参照)。

## 1. はじめに

計装制御システムは人間の体に例えると、脳神経系統に相当する機能を有する。制御装置(脳)からの指令信号によってポンプを駆動させることで、流体(血液)をプラント全体に行き渡らせ、何らかの異常をセンサー(感覚器)が検知した場合には適切な制御動作やインターロック動作により、異常状態の進行を抑制するように機能する。

原子力発電プラントは核分裂エネルギーを熱源としているため、安全機能の観点では、全制御棒を水圧で短時間に炉心内に緊急挿入(スクラム)し、原子炉を臨界未満に整定させる安全保護系が計装制御機能として存在する。

このような安全保護系とは別に、原子力発電プラントには主



注:略語説明 CR(Control Rod:制御棒)

図2 ABWR主要制御系の概略構成

これらの制御系が互いに協調しながらプラントの出力やその他のバイタルパラメータを制御する。

要制御系と呼ばれる重要な制御機能がある。BWR (Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)の主要制御系は、原子炉の再循環流量を制御する再循環流量制御系、原子炉への給水を制御する給水制御系、原子炉の圧力を制御する圧力制御系、制御棒の常駆動を制御・監視する制御棒操作監視系、そしてこれらを統括して出力を制御する自動出力調整系から構成される。ABWR (Advanced BWR:改良型沸騰水型原子炉)の主要制御系の概略構成を図2に示す。

主要制御系は、通常運転時においてプラントの出力や各種プロセスパラメータを所定の範囲内にコントロールする機能を有するとともに、通常運転状態とスクラム動作が必要な異常状態との間の過渡的なプラント状態において、プラントの出力を一時的に低下させるなどして、安全裕度の確保とスクラムの回避を行う機能も有する。過渡状態の後に安全が十分に確認された場合には、速やかにプラント出力を通常状態に復帰し、不必要な稼働率低下を削減することができる。

このように、主要制御系はプラントの出力を直接的に取り扱うため、プラント全体の運転・運用方針と重要なかわりを持つてくる。特に最近では、原子力発電所の高効率化を目的とし、長期サイクル運転や定格熱出力向上といった総合的なプラント運用方針が計画されるようになってきており、さらに、多くのプラントにおいては機器の信頼性や性能向上を目的としたリプレースも進んでいる。

新たな運転条件や新旧機器の混在するこのような条件において、プラント性能を最大限に発揮させた運転状態を安定的かつ信頼性高く継続させるためには、プラントの運用方針を十分に把握したうえで計装制御システムの設計や開発を行い、機器レベルからプラントレベルまでの広範な状態量を精度高く監視する計装システムと、適切な制御ができる主要制御

系の提供が不可欠である。

ここでは、原子力発電プラントの運用を取り巻く最近のトレンドと計装制御技術との関連、これらに関連するニーズに対応するための日立の取り組み、幾つかの具体的な計装制御製品、およびソリューション事例について述べる。

## 2. プラント運用を取り巻くトレンド

現在のプラント運用に求められているのは、安全性・信頼性を十分に確保したうえで、高効率化や合理化による経済性向上もターゲットとした高効率運用を達成することである。

設備利用率(稼働率)をプラントの高効率運用の指標とすれば、以下の式となる。

$$\text{設備利用率(\%)} = \frac{\text{発電電力量(kW}\cdot\text{hr)の合計}}{\text{定格電気出力(kW)} \times \text{暦時間(hr)の合計}} \times 100$$

したがって、分子が大きくなる方向、すなわち、ある単位期間における発電電力量を増やし、かつ発電期間が長くなるほど設備利用率が上がるため、高効率な運転ができたものと判断できる。

一般に機器の信頼性が向上すれば、定検(定期検査)期間以外でのプラント停止の頻度は減ることから発電電力量の合計値は増え、設備利用率も向上する。機器の信頼性のほかに、設備利用率を向上させるためには、プラントの基本的な運用を変更するといった抜本的な方策を採る必要がある。そのような方策の基軸となっているものは、(1)長期サイクル運転、(2)出力向上、および(3)定検合理化である。これらの方策の時間・出力軸での関係を図3に示す。

長期サイクル運転は、従来の約13か月といった運転サイクルを、燃料の改良などにより、18か月以上を目標として伸長

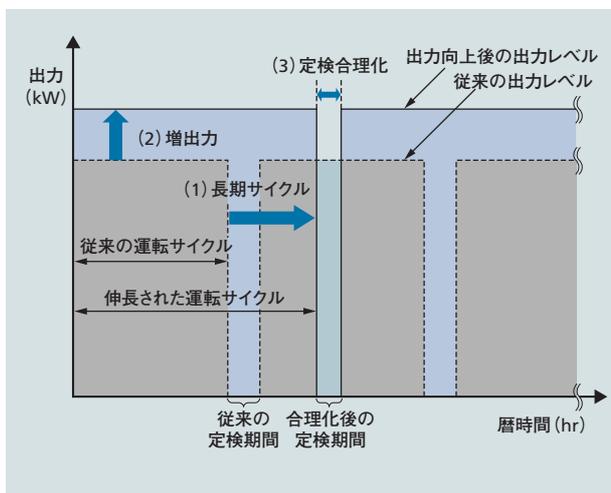


図3 高効率運転のための方策

出力軸に対しては出力向上方策が、また、時間軸に対しては長期サイクル運転や定検(定期検査)合理化による設備利用率の向上が対応する。運転サイクルとその間の出力で囲まれた短く(角)形領域の面積が出力×時間に対応するため、この面積が大きいほうが、より高効率の運転が達成できたものと判断される。

させようとするものである。出力向上は設置許可段階で認可された原子炉熱出力よりも大きな熱出力で運転することで、電気出力を向上させるものである。定検合理化はさまざまな方策の複合となるが、時間・出力軸の観点から見た場合、単純には定検期間を合理的に短縮し、単位期間当たりの発電電力量の合計値を増やすことを目的としている。これらの方策は排他的ではなく、組み合わせることでさらに効果的に高効率なプラント運用を達成することができる。

このような方策を実現させようとした場合、長期サイクル運転や出力向上を達成するための燃料技術、個別機器の仕様充足性、また、定検を合理化するための各要素技術といった直接的な技術に加え、主要制御系のような計装制御システムの重要性が増大する。

例えば、出力向上においては出力そのものの増加だけでなく、出力に関連する多くのパラメータ（給水流量や主蒸気流量など）も増加するため、主要制御系が制御する制御パラメータはより広い範囲に拡大する。前述した「通常運転状態」が必然的に広がり、これまで経験していなかった範囲での運転状態が制御対象範囲となりうる。また、長期サイクル運転になると、炉心の出力にかかわる負のフィードバックゲインの一つであるボイド反応度係数の絶対値も一般的には増加し、プラントの動特性を特徴づける内部パラメータも新たな領域へ拡大する可能性がある。

そのため、主要制御系にかかわる機器の高信頼化・高効率化と同時に、新たな運転領域における運転性や安全性評価のためのプラント動特性・安全解析技術や、プラントの運転状態を高精度に監視することのできる監視技術も同時に提供していく必要があると考える。

このような考えに基づき、日立は、これまで、ABWRプラントの計装制御技術の開発<sup>1)</sup>をはじめ、RFID (Radio-frequency Identification) といった最新の情報技術を応用したシステムの開発と実適用<sup>2)</sup>や、技術分野におけるソリューションを提供してきた(表1参照)。これらのソリューション事例について以下に述べる。

**表1** プラントの高信頼化・高効率化に関するソリューション事例  
各技術分野におけるソリューションの適用事例を示す。

技術分野	事例
解析・運転支援技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● APRシミュレーション</li> <li>● 運転訓練シミュレータ</li> </ul>
高度監視技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高精度熱出力監視計装</li> <li>● 最新プロセス計算機</li> </ul>
高効率化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高効率インバータ</li> </ul>
高信頼化制御技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● RIP-MFGシステム</li> <li>● 高信頼制御棒操作監視</li> </ul>

注:略語説明 APR(Automatic Power Regulator)、RIP(Reactor Internal Pump)、MFG (Motor-Fluid coupling-Generator)

### 3. ソリューション事例

#### 3.1 解析・運転支援技術

##### 3.1.1 APRシミュレーション

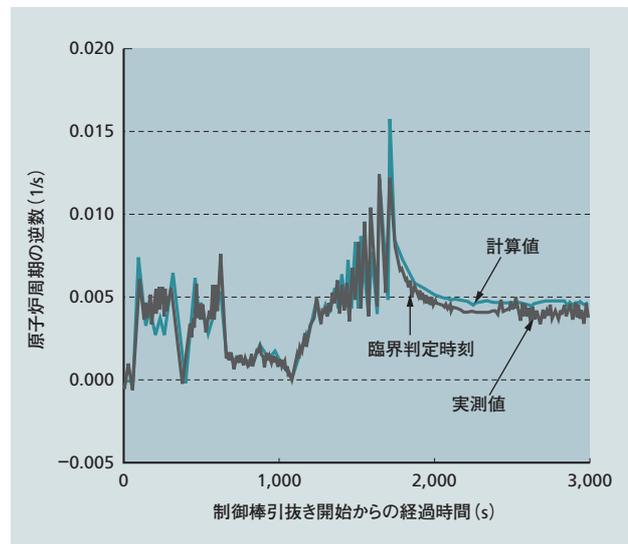
APR (Automatic Power Regulator:自動出力調整系)の制御アルゴリズムのうち、特徴的なものは臨界制御である。日立の臨界制御アルゴリズムは、ペリオド信号を使った連続・サブステップ・ステップのそれぞれの制御棒引き抜きモードの切替方式を採用している。この制御方式は、制御対象の炉心特性情報を基に、制御棒引き抜きシーケンス(制御棒グループの引き抜き順と引き抜き量)をオフラインで準備しておき、実際の制御においてはAPRは中性子束信号やその他のプロセス信号を基に、制御棒操作監視系に対してこのシーケンスに従った制御棒引き抜き制御を行うように動作する。

この制御方式の成否の鍵は、あらかじめのシーケンスの構成と検証である。この目的のために空間三次元多群動特性コードや昇温・昇圧制御過程での動特性解析コードを開発してきており<sup>3)</sup>、北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機において、それらの技術の完成形を見ている<sup>4)</sup>。

近い将来に実現されるであろうプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料混在炉心や長期サイクル運転向け炉心、そして出力向上など、今後の炉心運用状況は複雑化することが予想される。また、そのような状況に応じて炉心自体の解析手法も高度化されつつある。このような炉心運用動向を考慮し、日立はこれまでのAPR関連解析技術をさらに高度化させたプラント動特性解析技術を開発している。図4は次期プラントへの適用を計画しているAPR用動特性解析コードの解析結果の一例であり、実機の動特性をよく再現していることがわかる。

##### 3.1.2 運転訓練シミュレータ

原子力発電プラントの安定運転のためには、機械系の信



**図4** 臨界制御にかかわるシミュレーション例

臨界近接付近における逆ペリオド(原子炉周期の逆数)の実測値と計算値との比較を示す。よく一致していることがわかる。

頼性向上はもちろん、人間系の信頼性向上(訓練など)が不可欠である。日立が提供する最新プラントシミュレータは以下のような特徴を有し、運転訓練のため最適な設備を提供している。

#### (1) 実機ソフトロジックのエミュレーション

実プラント制御機器のデジタルコントローラに装着されたソフトロジックがそのままPC上で動作可能なエミュレーション技術を開発し、シミュレータ内でリアルタイムに模擬を実現している。実機のロジックを使用するため、実機の細かな動作がHMI(Human-machine Interface)画面も含めて忠実に再現される。

#### (2) プロセスシミュレーション

これまで培ったシミュレーション技術をベースに、再現精度の高い動特性モデルを実現しており、(1)との組合せによって模擬対象プラントの動作を忠実に再現可能としている。

### 3.2 高度監視技術

#### 3.2.1 高精度熱出力監視計装

米国原子力規制委員会の定義による出力向上手法の分類の一つとして、MUR(Measurement Uncertainty Recapture)型の出力向上がある。この手法は、熱出力計測の不確かさへの寄与として大きな割合を占める原子炉給水流量の計測を高精度化し、その分の保守マージンを、安全性を損なうことなく合理的に出力の増加に割り当てるというものである。日立は、1980年代後半より、超音波流量計による原子炉給水流量の高精度計測技術に着目し、この技術の国内展開についてさまざまな取り組みを行ってきた<sup>5)</sup>。

特に、米国において事実上デファクトのMUR型出力向上用超音波給水流量計となっているChordal型超音波給水流量計の性能を独自に評価し、国内メーカーとしては唯一、当該流量計を実機に設置して実稼動を継続している。

当該超音波給水流量計を特徴づけるChordalスプールと呼



図5 超音波給水流量計用のChordalスプール

このスプールは給水母管と周溶接で接続される。スプールの側面に規則性をもって設けられた管台部に超音波受発信用のセンサーが設置される。

ばれる溶接構造物は、溶接構造物としての健全性はもちろん、計測精度要求に合致した高い加工技術が要求される(図5参照)。日立は、今後の国内展開を踏まえて当該スプールの試作を通じて、スプール製作技術を確立している。

熱出力は設置許可申請書の記載値であり、定格熱出力運転認可後においては、熱出力レベルを適正に監視・管理することがプラントの高効率運転に直接的につながるようになってきている。

今後、最終目標としてはMUR型出力向上を定め、目標達成のための技術的検討を継続するとともに、現時点における熱出力監視制御のソリューション技術の核として、例えば前述のAPRとの融合による統合化された高度熱出力制御技術のラインアップとして加えていく計画である。

#### 3.2.2 最新プロセス計算機

プロセス計算機は、プラント性能計算および炉心性能計算のためのデータロガー設備としてスタートし、米国スリーマイル島原子力発電所における事故を契機に大幅な監視機能強化が図られ、1980年代以降には自動化システムの最上位装置として、原子力発電プラントを統括的に制御する役割が追加され今日に至っている。近年では、汎用技術を応用した分散型システム構成を採用し、役割に応じて定義した各種サーバを、オープンな標準ネットワークに接続し構築している。最新のプロセス計算機技術について以下に述べる。

##### (1) プロセス計算機内部計算処理の可視化

従来のプロセス計算機においては、ユーザーが内部計算処理過程を直接確認することができなかった。その一方で、何らかの原因で自動化が渋滞した場合の要因確認や、プラント性能計算の動作確認のために、内部計算処理過程を画面に表示させたいとの要望がある。こうした「可視化」のニーズに応え、計算処理をヒューマンフレンドリーなグラフィック言語で記述し、その計算処理過程をプログラム図面とともに表示することで、透明性の高い計算処理を実現している。

##### (2) 重要機能に対するセキュリティ対策

原子力発電プラントを統括制御するプロセス計算機システムは、セキュリティに対する要望が高い。最新システムでは、機能ごとにセキュリティレベルの設定を可能とし、ICカードの認証によってレベルに応じた操作のみが行えるように、セキュリティ対策を強化している。

### 3.3 高効率化技術

低回転域でも高効率運転が可能なインバータは、消費電力の低減に寄与する効果が大きく、モータ制御に幅広く適用されている。BWRにおける適用個所は原子炉再循環ポンプモータ制御であり、1990年代前半から実プラントに適用し、安定運転に貢献している。近年では、出力トランスが不要な高

信頼高圧ダイレクトインバータを原子力用途向けに開発し、工場実証試験を完了した(図6参照)。

このインバータ装置においては、制御回路の二重化に加え、主回路バックアップ方式( $n$ 系統の主回路に1系統のバックアップ主回路を用意)に対応可能なシステムとし、いっそうの信頼性向上を図っている。

今後は既設BWRの設備更新など、国内外の原子力発電所に適用し、所内負荷低減と保守性向上に寄与していく予定である。

### 3.4 高信頼化制御技術

#### 3.4.1 RIP-MFGシステム

RIP-MFGシステムとは、ABWRの出力制御の要である再循環流量制御系のインターナルポンプ(RIP:Reactor Internal Pump)用可変周波数電源装置として、従来のBWRにおいて適用実績のある流体継手付きのMGセット(MFG:Motor-Fluid coupling-Generator)を適用したシステムである<sup>6)</sup>。

可変周波数機能と機械的慣性による周波数擾(じょう)乱へのバッファ機能を兼ね備えたRIP-MFGシステムは、過渡事象に対する耐性を損なうことなく設備を合理化できるシステム構成であり、日立のユニークさを象徴するシステムである。

特にRIP-MFGシステムの開発にあたっては、信頼性確保、ならびに許認可対応のための各種の取り組みが続けられてきた。それらは、概念設計段階での各種机上検討や設置許可安全解析から始まり、RIPとMFGの組合せ状態をシミュレートするための機械—電気系連成解析コードの開発や、実機製品の現地搬入前の工場における総合的な試験の計画である。

このような取り組みの成果として、2008年10月に中国電力株式会社島根原子力発電所3号機納めのRIP-MFGシステムの工場総合組合せ試験が実施され、これまでの事前検討におけるシミュレーション結果と実機の動特性とのよい一致を確認することができた(図7参照)。



図7 中国電力株式会社島根原子力発電所3号機納めのRIP-MFGシステム

実機製品を工場内に組み上げ、RIPの性能試験を実施するRIP試験センターのRIPと接続し、総合的な組合せ試験を実施した。

今後、これらのシミュレーション技法や工場試験データを基に、現地における系統試験・起動試験段階での試験効率化やさらなる信頼性確保を図っていく予定である。

#### 3.4.2 高信頼制御棒操作監視

制御棒操作監視システムは、制御棒の挿入・引き抜きを直接制御する装置であり、原子炉の出力制御に直結する重要な設備である。従来のABWRにおいてはステップモータを用いて制御棒を駆動していたが、新たにIM(Induction Motor)を適用することによって部品点数を大幅に削減し、故障発生リスクをより低減した高信頼制御棒操作監視システムを開発した。

特にこのシステムは、IMへの電源のオン・オフ制御によって制御棒の位置決め制御を行うため、オン・オフ制御応答速度と電源切換時のノイズの低減が技術課題となる。この技術課題解決のために、オン・オフ制御素子として半導体素子であるサイリスタ(SSC:Solid State Contactor)を採用し、ノイズや応答性にかかわる制御仕様を充足するように工夫した(図8参照)。

このシステムもRIP-MFGシステムと同様、制御システムとIMで駆動する制御棒駆動装置(IM-FMCRD)との組合せ試験を実施し、採取試験データを分析することで制御特性の検証を行っている。

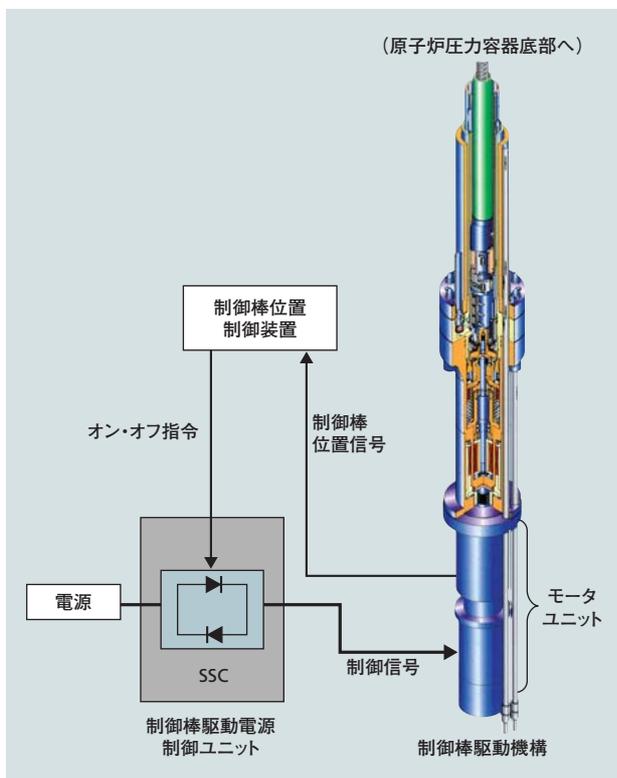
今後、これらの検討結果と、前述のAPRシミュレーション技術を融合し、IM-FMCRD適用時の制御棒による出力制御特性の評価を実施する計画である。

なお、このシステムでは、高速光ネットワークにより、統括保守装置に情報を集約することでサブシステムの状態を一括して確認可能であり、いっそうの保守性向上も図っている。



図6 原子力向け高圧ダイレクトインバータ

セルインバータ(写真右)を多段に組み合わせることにより、出力トランスレスでモータの直接駆動を可能としている。



注:略語説明 SSC(Solid State Contactor), IM(Induction Motor)

図8 制御棒操作監視システムのIM駆動制御部構成

SSCへの指令により、IMと制動ブレーキへの電源を適切なタイミングでオン・オフすることで制御棒の位置決め制御を行う。

#### 4. おわりに

ここでは、原子力発電プラントの運用を取り巻く最近のトレンドと計装制御技術との関連、これらに関連するニーズに対応するための日立の取り組み、幾つかの具体的な計装制御製品、およびソリューション事例について述べた。

#### 執筆者紹介



##### 長谷川 真

1995年日立製作所入社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力制御計画部 所属  
現在，原子力発電所の計装制御計画に従事  
博士(工学)  
日本原子力学会会員，計測自動制御学会会員



##### 杉浦 達人

1994年日立製作所入社，情報・通信グループ 情報制御システム事業部 原子力制御システム設計部 所属  
現在，原子力発電所の監視制御設備の設計に従事  
日本原子力学会会員

#### 参考文献

- 1) 清治，外:最新の原子力発電所監視制御システム，日立評論，83，2，183～186(2001.2)
- 2) 恩田，外:原子力プラントへのRFID高度応用システムの開発，日立評論，90，2，156～161(2008.2)
- 3) Y.Ishii, et al.:Plant Simulation System for Developing ABWR Automatic Power Regulator System, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.46, No.1(2009)
- 4) 吉森，外:志賀原子力発電所2号機の起動試験評価，日本原子力学会2006年秋の大会(2006.9)
- 5) 長谷川，外:浜岡5号機における原子炉給水高精度超音波流量計の適用実績と精度評価，社団法人火力原子力発電技術協会中部支部(2008.3)
- 6) A.Mizuide, et al.:The Application of Motor Fluid Coupling Generator to the Power Supply of Reactor Internal Pump, ICONE 9(2001.4)