

エネルギーシステム計装制御技術の展望

Technology Trends in Instrumentation and Control of Contemporary Energy Systems

吉川 榮和*

Hidekazu Yoshikawa

1. はじめに

本稿では、火力、原子力、電力系統などのエネルギーシステムにおける最近の計装制御技術の共通動向を展望するが、個々の具体的事例では筆者の専門とする原子力が主となることを最初にお断りしておく。

近年の計算機制御・情報処理技術の目ざましい進展を適用して、エネルギーシステムでは自動化が積極的に進められてきた。図-1は、自動化のレベルと、自動化のもたらすシステムの複雑化のレベルの2軸で、エネルギーシステムの技術的進歩を展望したものである。対角線上のレベル0からレベル4は、初期のプラントから究極の完全自律プラントへの、プラントの技術段階をレベル分けしたものであるが、火力、原子力、電力系統などのエネルギーシステムの計装制御技術は、最近ではレベル3の方向へと等しく進化の傾向を示し

ている。すなわち、図中の対角線から上の部分の制御技術の進展では、手動制御からリアルタイム制御用計算機によるデジタル自動制御へ、対角線の下部のマンマシンインタフェース技術の進化では、システムの監視・操作のため、ばらばらのアナログ信号表示の人間による情報統合から、知識情報処理などの計算機による情報統合・支援へと進展している。

このような自動化の進展により、プラント制御における機械対人間の比重は、最近では機械の比重が益々高まり、人間は手動操作者としての役割からシステムの監視者、更には状況管理者へと変貌している。そして、究極のレベル4へ向かって、ロボットによる補修技術、プラント情報・運転経験のネットワーク化データベースシステムによりプラント設計・製造・運転・補修のプラント全寿命における高信頼化のための予防保全技術の達成を目標に制御情報システムとしての一

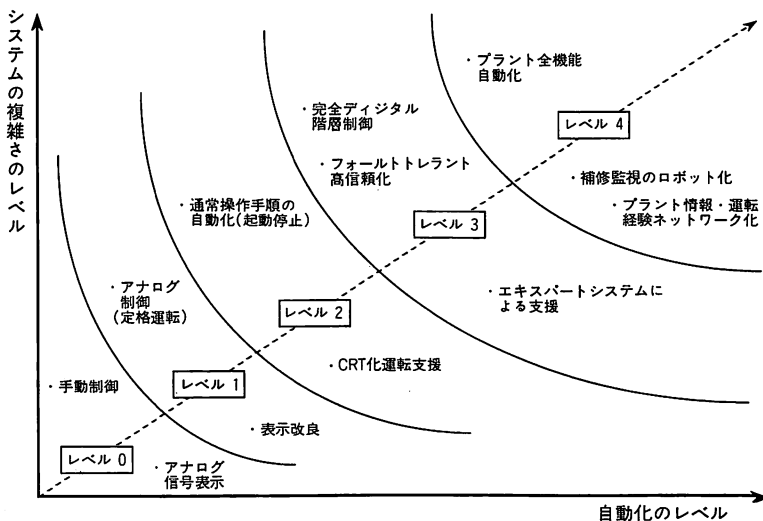


図-1 エネルギーシステムの計装制御系の技術的進化

* 京都大学原子エネルギー研究所 原子炉計測工学研究部門 助教授
〒611 宇治市五ヶ庄

元化を目指した技術開発が着々と進められている。

以上が最近のエネルギーシステムの計装制御技術の一般動向であるが、以下の2, 3, 4では、計算機制御技術, マンマシンインタフェース, 予防保全技術の各々の現状と課題について述べ、4では将来のエネルギーシステムの動向と計装制御技術への期待を述べて結びとする。

2. 計算機制御技術の進展の展望

制御用計算機のリアルタイム技術, マイクロプロセッサ, 光ファイバーによる光多重伝送などの制御・情報伝送技術の向上により, エネルギーシステムの計装制御では, 従来のアナログ制御からDDC (Direct Digital Control) が大幅に採用されるようになった。そしてプラントシステムの制御は最初は個々の装置毎に分散的に行われていたが, 複雑・高度な要求に対応するため統合, 集中化が図られてきた。しかし, システムへの要求機能の多様化, 高度化とともに制御システムは益々複雑かつ大規模になり, 従来の制御システムの構成では, ①超高速の計算機ハードウェアが必要となる, ②システム開発の計画から稼働までに多大の時間がかかる, あるいは繁雑に生じるシステム変更要求に対処できない, ③システムの大規模化と共に高信頼化のコストが増大する, などの問題が生じてきた。これは多くの処理がシステムの特定期間部分に集中するボトルネックによるものとして, 最近では処理の分散化を目指す分散計算機制御システムが解決策として実用化され, 用いられるようになった。このような技術の進歩には, 分散計算機制御システムを構成する, システムアーキテクチャ, 分散オペレーションシステム, 分散データベース, リアルタイム制御用プログラミング言語, 計算機間・プログラム間通信, ソフトウェア

開発支援システムなどの要素技術の発展があるが, これらの技術と発展動向の詳細については, 文献^{1), 2)}などに譲る。

分散計算機制御システムは, 部分の統合化を保ちながら, 処理の分散を図るもので, 制御システムの高度な機能実現とともに, 集中部を排除することで処理の高速化や, システムの拡張性, 信頼性を可能にしている。分散計算機制御システムの実際の適用例については, 火力発電プラントでは例えば文献³⁾, 電力系統では文献⁴⁾, 原子力では例えば文献^{5), 6)} (新鋭軽水炉), 文献⁷⁾ (高速増殖炉もんじゅ)などに譲る。

計算機制御技術の進歩により機械システムの自動化が拡大した現在では, 昔のように人間が機械を制御する姿から, システム全体の中での人間は, 機械の自動機能が正常に動作しているかを監視し, 機械の自動機能が異常になった時にこれを手動でバックアップしたり, 機械に自動機能が備わっていない状況に至った場合に, システムを手動で操作するという, 補助的な役割になってきている。しかし, システムの制御対象が益々大規模化, 複雑化した現在では, そのシステム設計において機械と人間の役割分担を如何にすべきかが大きな問題となっている。表1は, 自動化の拡大にまつわる利害得失についての議論を対比したものであるが, これを見ると確かに自動化の追求は, システムの信頼性の向上に有用ではある。一方これを監視・操作する人間側への要因としては, システムが大規模になり複雑化しすぎて, 人間の理解の範囲を越え, ブラックボックス化に伴う心理的不安やストレス発生といった労働衛生上の問題や, システムへの過度の依存による技量低下のため, 緊急時の対処能力を欠いて, かえって大事故になるといった安全上の問題点も指摘されている。事実, 過日のTMI事故やチェルノ

表1 機械システムの自動化の長所と短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> ・スケールアップと生産性向上 ・手動によるワークロード, 疲労減少 ・手動による定型操作の減少 ・定型操作の精度向上 ・軽微なエラーの減少 ・個人差の減少 許容誤差の縮小 品質管理の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・人間性喪失, 仕事のやり甲斐低下 ・操作者の警戒心の低下 ・技量低下, 特に異常・緊急時対応への不安 ・システムへの依存心の増大 ・音もなく故障する ・誤警報の発生 ・システム故障に弱くなる (black box化) ・更に大きなエラーを誘発する ・高級技術者の必要性増大 ・精神的ワークロードの増加 ・事故の波及, 誘発性

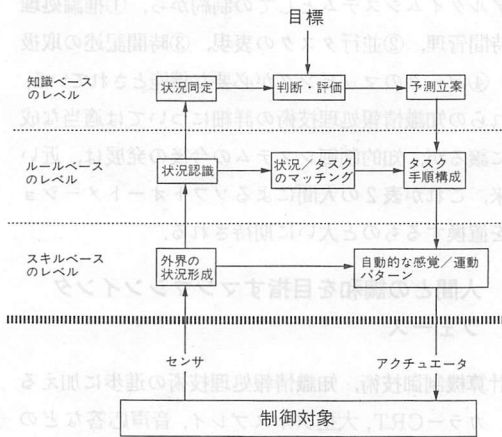


図-2 ラスムッセンの3つの認知行動モデル

ビル事故など科学技術システムの最先端の原子力プラントの重大事故では人的要因がいつも問題とされたことはまだ記憶に新しい。今や機械側のみの視点でなく、人間側の視点にたった最適なマンマシンシステムの設計のあり方が今日の課題とされるようになってきている。

このような人間を中心とする、人間と機械の機能分担のありかたを考察する上で、ラスムッセンの洞察したマンマシンインタフェースにおける人間の3つの認知行動モデル（スキルベース、ルールベース、知識ベース）⁸⁾に即したマンマシンシステムにおける人間と機械（計算機）の機能分担が有効なアプローチであろう。ラスムッセンの提案したオペレータの認知行動モデルを図-2に示す。人間中心の自動化システムの構成には、これらの3つの認知行動レベルのいずれをも有効に計算機で支援しうるものであることが重要である。このような観点での人間と機械の機能分担と自動化の概念を表2に示す。なお、表中の「ハードオートメーション」とは、「完全に解明され、数学的に定義化されたシステム挙動に基づく状況対応」のことで、これを人間が実行する場合には正確な技量、信頼性が要求されるが、計装制御系による自動化の方が有効な領域である。また、「ソフトオートメーション」とは、機械によるハードオートメーションでは、高価になりすぎた

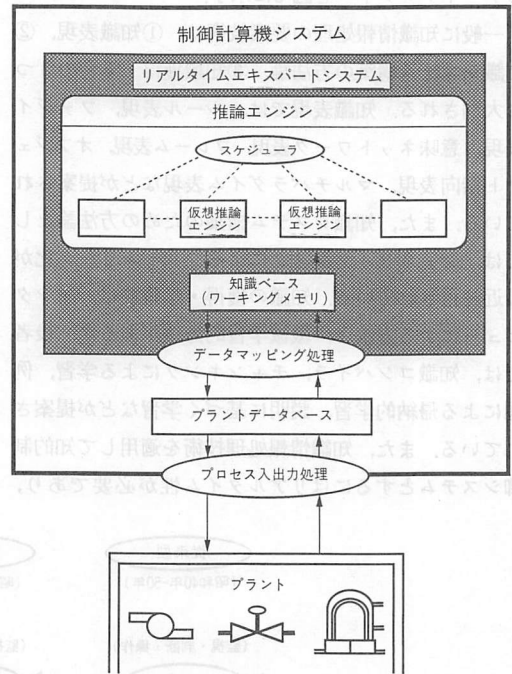


図-3 リアルタイムエキスパートシステムのアーキテクチャ

り、まだその技術がない、あるいは人間の方が信頼できる、また状況判断が必要である、といった理由で人間の技能に依存する場合である。そして、「創造的状況管理」とは、システムの運用の計画、立案、状況の解決、改善対策といった人間による高度な認知判断行動にのみ依存する部分である。

表2のような自動化の枠組みの中のルールベース、知識ベースの人間行動への計算機による支援機能実現のため、最近では知識情報処理の適用研究が極めて隆盛である。竹垣らによれば、このような分野への適用を対象とする知識情報処理を「知的制御システム」と名付けている。⁹⁾竹垣らはこのような知的制御システムとしてERICを開発しているが、その他に制御用リアルタイムエキスパートシステムとして、G2などがある。このようなリアルタイムエキスパートシステム

表2 マンマシンシステムにおける人間と機械の機能分担と自動化の概念

行動タイプ (内容)	機能分担	
	人間	機械
知識ベース (創造的思考)	創造的状況管理	支援機能
ルールベース (予め規定された対応)	ソフトオートメーション	支援機能
スキルベース (自動的な条件分岐対応)	ハードオートメーション	ハードオートメーション

のアーキテクチャーを図-3に示す。

一般に知識情報処理の要素技術は、①知識表現、②知識システム構築の方法論、③知識獲得・学習の3つに大別される。知識表現では、ルール表現、ファジ表現、意味ネットワーク表現、フレーム表現、オブジェクト指向表現、マルチパラダイム表現などが提案されている。また、知識システム構築のための方法論としては、ジェネリックタスクによるフレームワーク化が最近注目されている。知識の獲得・学習では、インタビューによる方法と、機械学習の方法があるが、後者では、知識コンパイラ、チャンキングによる学習、例題による帰納的学習、説明に基づく学習などが提案されている。また、知識情報処理技術を適用して知的制御システムとするにはリアルタイム性が必要であり、

リアルタイムシステムとしての制約から、①推論処理の時間管理、②並行タスクの表現、③時間記述の取扱い、④データのマッピングが必要な機能とされている。これらの知識情報処理技術の詳細については適当な成書に譲るが、知的制御システムの今後の発展は、近い将来、これが表2の人間によるソフトオートメーションを置換するものと大いに期待される。

3. 人間との調和を目指すマンマシンインタフェース

計算機制御技術、知識情報処理技術の進歩に加えるに、カラーCRT、大型ディスプレイ、音声応答などのマンマシンデバイス技術の進歩により、近年のエネルギーシステムの計装制御システムは、運用監視・制御、

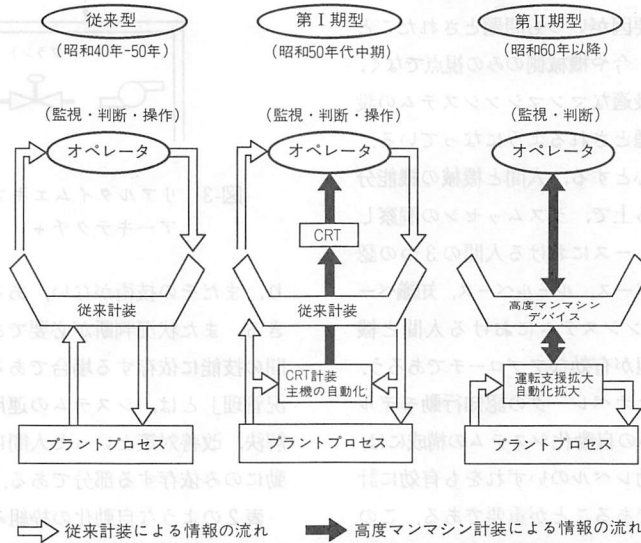


図-4 原子力におけるマンマシンインタフェースの変遷

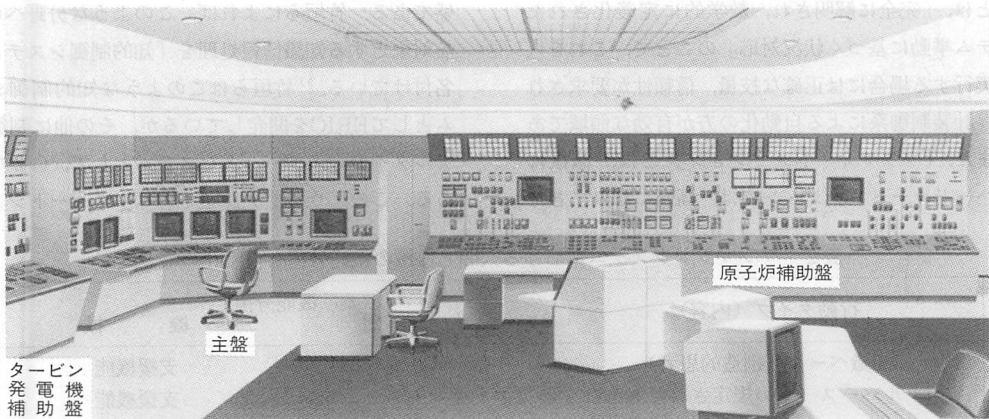


図-5 大飯3、4号発電所の中央制御盤 (関電提供)

表3 将来の原子力マンマシンインタフェース実現の要素技術と成果

要素技術	課題	成果	今後の課題
運転員の思考モデリング技術	運転員の思考プロセス	プラント重要機能モデルとして実現	有効性の検証方法
診断ガイド技術	異常診断 対応事象の拡大 オンライン推論 柔軟なガイド提供	定性モデルによる過渡時診断と付随故障への対応 記号処理と数値処理の統合化により1秒の応答で診断 階層化ベトリネットによる操作手順のモデル化	知識ベース構築 (プラント全体への拡張)
予測技術	安価で高速(実時間の10倍程度)のシミュレータの実現	並列処理マシンの適用とタスクスケジューリング	予測シミュレータの具体的適用
音声認識技術	連続音声認識で実用レベル(90%)の認識率の実現	現場環境で500単語で95%の認識率	音響知識獲得等の周辺ツールの整備と実環境への適用性向上
プラントデータ編集管理技術	プラントデータ、推論用知識ベースの入力・編集、管理	汎用的データ入力ツールとして図形データ(系統図など)、操作手順の入力機能	ツールとして実際の運用 各サブシステム個々の編集・検証支援機能

保守支援を一体化する「総合化システム」として、拡大化の傾向にある。このような総合化における基本的な方向は、人間とのインタフェースにおける監視性、操作性、判断支援の3軸で、それぞれ情報の総合化、プラント自動化、知能化を拡大し、運転信頼性の向上、運転・保守の効率化を目指すものである。

このような方向へのマンマシンインタフェースの変遷を、原子力について示すと図-4のようになる。すなわち、昭和40年代の従来型から、50年代中期の第I期型を経て60年代以降の第II期型へと発展している。第I期型では、CRT計装が導入され、第II期型では高度マンマシンデバイスが従来型の盤に置き換わり、運転支援と自動化の範囲が拡大して運転員のタスクから操作の側面が解放されている。具体例としては第I期型にはPODIA、NUCamm-80、第II期型にはA-PODIA、NUCamm-90がそれぞれ相当する(いずれもBWR用)^{6,10)}

第I期型から第II期型への技術進歩では、部分デジタルから全デジタルになり、安全保護系もハードワイヤからソフトロジック化され、情報伝送方式もメタルケーブルから光ケーブル化された。その結果、約70%の制御盤のコンパクト化、約60%のケーブル長の短縮が図られた。そして保守機能についても個別的、部分的診断から、第II期では集中診断保守のための計装制御系診断ツールも組み込まれている。また、自動

化の拡大と、人間工学的に優れたマンマシンインタフェース構築により、運転・保守員の負担軽減とヒューマンエラー低減が期待される。図-5に近々運用される関電・大飯発電所(PWR)の中央制御盤を示す。これはCRTによる監視を主体とし、運転モードに応じた機能分割型制御盤の採用により、誤操作防止を図り、制御室の空間設計や照明設計にも人間工学的配慮を採用している。¹¹⁾

一方、将来の原子力プラントの総合計装制御システムについては、知識工学を中心とした計算機利用技術と認知特性を考慮した人間工学を積極的に導入することにより、人間に近い推論・判断を可能とする診断、ガイド機能とマンマシンインタフェース実現を目指した、開発プロジェクトが進められている。¹²⁾ これでは以下の4つの支援機能を目指している。

- ①通常時支援機能・・・最適な再起動手順の探索と再起動計画の作成。起動停止時および負荷追従運転時の柔軟な操作ガイドの提供。
- ②異常時・事故時運転支援・・・異常・事故の早期発見と原因同定、および予測シミュレーションによる事故拡大防止と安全停止のための適切な操作ガイドの提供。
- ③保守時支援・・・機器補修に伴う隔離範囲の推定、プラント運転への影響推定、および隔離操作手順のガイド。

④最適運転監視機能・・・運転員の認知モデルを適用した最適情報の提供と高度マンマシンデバイスを利用したマンマシンインタフェースの向上。

これら4つの支援機能実現のための新しい要素技術とこれまでの成果、そして今後の課題を表3に示す。

一方、マンマシンシステムにおける人間側の技能向上、人的信頼性向上のための教育・訓練に、フルスコープシミュレータやCAIの活用が、火力、原子力、系統運用の分野に共通して活発である。最近では認知特性を考慮し、知識工学を応用した知的CAIや、さらにこれに簡易シミュレータやマルチメディアデータベースを結合したシステムの研究も各所で行われている。

4. 設備利用の高信頼性を旨す予防保全

近年、安定した信頼性の高い電力供給を目標に、電力設備全般に予防保全技術への取り組みが内外で積極的に展開されている。これには、既存プラントの廃棄や新規プラントの立地困難な状況、新設よりも既存プラントの修理保全の方が経済的であることから、既存プラントの補修改善や再生により、設備の高効率化、高機能化を図り、かつ長寿命化を達成しようとの考えが背景にある。予防保全は、計測、システム、制御、情報処理の分野で、新しい視点のアプローチを要する技術領域である。以下、電力設備全般での国内重電各社の予防保全への取り組み状況を述べる。^{13,14,15)}

水力では、明治25年の発電開始以来ほぼ1世紀を経て、今では1600カ所以上の発電設備の70%以上が40年を経過している。これらの水力発電設備の長寿命化、近代化の課題として、①高精度の余寿命診断技術（水車の超音波非破壊検査、発電機固定子コイル寿命診断など）、②設備の無保守化などが進められている。

昭和30年代に電力設備の主役を担った火力は、その後の原子力の導入と拡大により、ベースロードからWSS (Weekly Start Stop)、DSS (Daily Start Stop) を主とする中間負荷運用に転換している。火力の予防保全では、①余寿命診断（ボイラ、タービン、発電機、電動機、電気部品）、②主機（ボイラ、タービンロータ）の技術改良とマイクロエレクトロニクスの適用による大幅な自動化と制御特性改善、③蒸気タービンなどの所内動力低減、排気再熱プラント、リパワリングなどによる効率向上、燃料節減と炭酸ガス対策、④プラント管理システム（事故・不具合管理、余寿命管理、劣化診断、定期検査履歴管理、関連図書管理およびこれらの予防保全情報の一元管理を行う総合予防保全シ

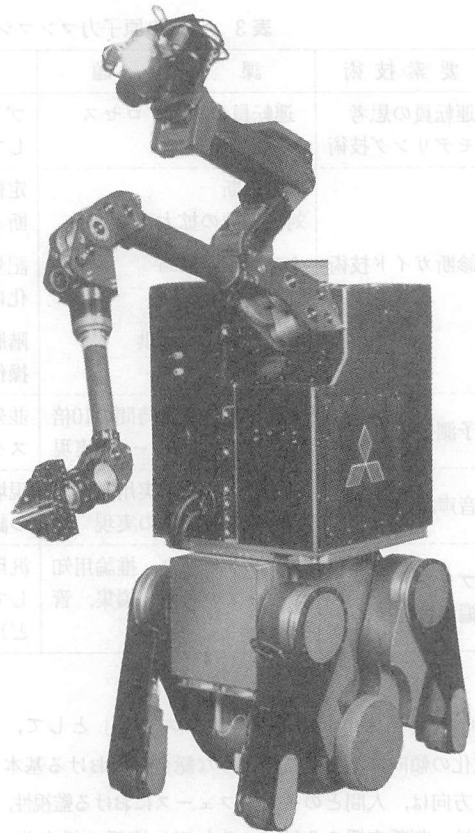


図-6 格納容器内軽作業ロボット（三菱重工提供）

ステム）を進めている。

原子力は導入以来、約70%以上の設備利用率を達成しているが、20年を経過したプラントもあり、予防保全への取り組みに積極的である。まず、設備診断の支援では、プラント数増大の一方、熟練技術者も限定されることから、機器・設備診断の効率化、高精度化へエキスパートシステムによる支援システムの開発（制御棒駆動機構や水質の診断、配管・ケーブルの劣化診断など）が行なわれている。また、設備の状態監視診断技術、点検保守履歴情報管理技術を一元化し、広範囲のネットワーク化、保全計画立案の効率化を総合予防保全システムにより達成しようとしている。原子力では放射線下の作業という特殊条件があり、ロボット技術を用いる遠隔点検・補修技術（AIマニピュレータ、モノレール式小型点検ロボット、海水管清掃ロボットなど）の開発が進められている。図-6には格納容器内軽作業ロボットの写真を示す。その他、材料自体の極微少な損傷変化兆候の検出技術として、超電導量子干渉素子センサの研究も始められている。

最後に送変電設備関係では、これらを長期間停止し分解点検の行いにくい状況から、未然防止、延命化の観点で稼働中の診断、状態監視用に可搬型高精度診断装置の開発などが進められている。

以上、全般として予防保全技術は、①設備・機器の保全法、管理法、②余寿命診断法、③新しい技術の適用による設備の改善、④個別技術、情報を有機的に統合化する総合予防保全技術の構築、の4つの方向で展開されている。

予防保全技術の基盤は、材料科学、破壊力学、電気化学、計測工学、システム工学、制御工学、信頼性工学、伝熱工学、・・・と広範囲にまたがり、総合的、学際的性格が極めて強い。その目標達成と実際の適用には、個々の要素技術やアナリシ技術の進歩と共に、お互いがバランスのとれた総合システム化が極めて重要とされている。

5. 結び

近年の電力需要の傾向は、エネルギー多消費の重厚長大から軽薄短小型への産業構造の転換により、産業部門でのエネルギー需要は横ばい傾向であるが、流通部門の増大、OA化や冷暖房の電化などによる民生部門での需要増大に伴い、依然として需要増（特に夏場）の中で、供給予備力の低下、負荷率の低下による設備利用率の低下、電力供給の質的向上の要求などが問題とされるようになってきた。一方、炭酸ガスなどによる地球温暖化の懸念による環境問題、反原発運動などにより在来火力や原子力の新規電源立地も前途は厳しい。

このようなエネルギーを取り巻く情勢に対し、従来のスケールメリット追求型のエネルギーシステムから「エネルギーシステムの多様化とシステム化」への転換が趨勢とされ、今後の技術的課題として、①新しい中小規模エネルギー供給技術、②新しい情報・システム運用技術、が要請されている。¹⁶⁾ 本特集でも取り上げられている、燃料電池やコージェネレーションプラント、更に太陽光発電などは①に対応するものであるが、これらの将来型中小規模プラントは、火力、原子力などの大規模エネルギープラントと組み合わせ分散型

エネルギーシステムとして運用し、最適ロードマネージメントによる設備利用の効率化、環境対策、省エネルギー、電源開発の期間短縮などの問題に対応しようと考えられている。一方、このような将来の分散型エネルギーシステムの効果的運用に、②はまさに中枢機能を担うものとされている。そのためには、最新の計装制御技術を駆使し、広域に分散する供給と需要の調整に自律分散制御の思想を取り入れたシステムを構築するなどの新しいアプローチを必要とするであろう。

このような将来のエネルギーの課題に対処するため、新エネルギー源の開発と相まって、エネルギーシステムの計装制御技術の高度化が今後も益々重要な役割と使命を担うものと期待する次第である。

参考文献

- 1) 三巻達夫, 桑原洋; 制御用計算機におけるリアルタイム技術(1986), コロナ社.
- 2) 田村信介, 他; 分散計算機制御システムの構成, 電気学会全国大会講演論文集, S.15-1, (1990).
- 3) 鍛冶明, 他; 火力発電プラントにおける計算機制御システム, 日立評論, 50巻, 5号(1988), 17-22.
- 4) 森田憲一, 他; 電力系統分野における計算機制御システム, 同上, 9-16.
- 5) 三宅雅夫, 他; 原子力発電プラントにおける計算機制御システム, 同上, 23-28.
- 6) 早川博康, 他; 計装制御技術, 東芝レビュー, 44巻, 4号(1989), 314-317.
- 7) 原広, 他; 高速増殖炉もんじゅ発電所の計測制御設備, 東芝レビュー, 45巻, 7号(1990), 552-555.
- 8) Rasmussen, J; Skills, Rules, and Knowledge; Signals, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, Trans.IEEE-SMC-13, No.3(1983), 257-266.
- 9) 竹垣盛一, 石岡卓也; 知的制御システム 制御とオペレーションのための知識情報処理(1990), 海文堂.
- 10) 藤井博章, 他; 最近のBWR計測制御新技術, 日立評論, 72巻, 10号(1990), 63-70.
- 11) 岡崎旦, 他; 大飯3, 4号機向け計装制御システム, 三菱電機技報, 64巻, 3号(1990), 4-8.
- 12) 犬房和夫, 他; 将来プラント向け総合計装制御システム, 同上, 13-17.
- 13) 木村佑二, 他; 予防保全技術, 同上, 39-43.
- 14) 特集 電力設備の予防保全技術, 日立評論, 第72巻, 8号(1990).
- 15) 富田仁治, 他; プラント保全技術, 東芝レビュー, 44巻, 4号(1989), 306-309.
- 16) ソフトノミックス・フォローアップ研究会; エネルギーシステムの新しい展開(1986), 大蔵省印刷局.