

■ 展 望・解 説 ■

原子力プラントにおける人工知能の応用

Application of Artificial Intelligence to Nuclear Power Plants

北 村 正 晴*

Masaharu Kitamura

1. はじめに

原子力プラントの安全性、経済性の一層の向上を目的として、人工知能 (Artificial Intelligence; AI) 技術の応用が急速に進められている。人工知能技術という術語は様々な意味で用いられ、またより狭義の知識工学という術語と混用されることも多いが、ここでは「人間の持つ固有な知的能力を計算機上で近似的に実現し、これによって問題解決を図る技術」と仮に定義しておこう。その具体的内容は後述の実例を通じて明らかにしていきたい。なお簡単のため以下ではこの技術を AI と略称する。

原子力の分野で AI の応用研究が始められたのは 1980 年代に入ってからであるが、当初この技術の有用性については国内外を問わず懐疑的、否定的な意見が多く聞かれた。AI という術語が歴史的には、1950 年代から知られていながら、実用的応用例が殆ど知られていなかったことがその原因であろう。1985 年に米国原子力学会が初めて AI の原子力応用に関する国際会議を開催したが、そのような否定論もあって会議の正式名称は「原子力プラントの運転制御への計算機応用」国際会議とされている。この会議では約 20 件の AI 関連報告がなされたが、この会議が発展したものととして本年 (1987 年) 9 月に同じく米国原子力学会が主催した「原子力産業への AI およびその他の革新的計算機技術応用」国際会議では 100 件を超える報告と約 30 件の展示がなされており、その発展ぶりはめざましい。日本原子力学会でも AI を応用した研究開発の報告件数が近年増加を続けている。短い期間の内にこれ程急速に成長した応用技術は他に例をみないといえよう。本解説ではこのような原子力への AI 応用の実情を要約して紹介し発展の要因について考察すると共に今後の動向についても若干の展望を述べることにする。

2. 原子力における AI 利用の背景

原子力プラントを対象としてこれまで開発されてきた AI 応用技術の代表例をまとめて表 1 に示した。その具体的内容については後に述べるが、プラントの設計建設、運転、保守の各々、換言すればプラントに関連する作業の殆ど全てについて AI の応用が進んでいることがおわかり頂けよう。しかも後述するようにその大多数はエキスパートシステムに代表される知識工学技術の利用といえる。この背景について簡単に考察しておきたい。

表 1 原子力における AI 技術の応用範囲

分 野	具 体 例
設計建設	機器レイアウト決定 配管経路計画 安全解析 (過渡現象, リスク評価 用大型計算コード運用支援)
運転操作	起動, 停止, 出力変更操作 外乱原因同定, 対策指示 燃料交換手順立案 異常時操作手順
保守保全	故障原因同定, 対策指示 保守作業スケジューリング

表 1 に示したような各作業の具体的内容を検討してみればいずれも、その実態についての学問的体系化は殆どなされていないことが容易に理解される。原子力になじみのない読者は他の産業に置き換えて類推を試みられれば事情は同様であることは明らかであろう。各産業にはそれぞれ関連する基礎科学、工学が存在することは当然であるが、現実の産業現場でのタスク遂行はその大部分が担当者の経験的知識、いわゆるノウハウに依存した形で行われている。その結果として以下のような問題点が常に存在することになる。

- (1) タスク遂行の結果が個人の技量に強く依存
- (2) 同一人でも体調、ストレス等により結果変動
- (3) 熟練者技量の伝達継承の困難

* 東北大学工学部原子核工学科助教授
〒980 仙台市荒巻字青葉

(4) 要求仕様の高度化による作業負担の増大。

AI技術、なかでも知識工学は従来回避不可能なものとして受容されてきたこれらの問題点について、その克服のための手掛りを提供するものである。原子力産業を含む多くの産業分野で現在AI技術の応用は急速に進められつつある背景にはこのような事情があると解釈される。すなわち強いニーズは潜在的に存在していたが対応技術が未成熟であった産業界の現状に対し、AI技術によってようやく有力な手段が提示され始めたことが、AIが多くの分野で歓迎されていることの背景であろう。従来の計算機技術が不得手とする問題領域に対して強力な問題解決手段を提供するAI技術それ自体については参考書も多数出版されている^{1)~3)}のでそれらを御参照頂くこととし、本稿では実際の産業への応用という観点から原子プラントの場合を例にとりその具体的方策、成果、問題点等を述べてみたい。

3. 診断支援システムへの応用

AIの実用可能性に関する認識を飛躍的に高め他分野への応用の拡大を促進した例として、感染症診断システム MYCIN⁴⁾ が広く知られている。この応用が“診断”であったこと、これとほぼ時期を同じくしてスリーマイル島原子力発電所の事故が原子力産業界に大きな衝撃を与えたことの両側面から、原子力プラントの運転員支援にAI技術を応用する試みは積極的に推進されつつある。AI技術応用の上で留意すべき重要なポイントの説明も兼ねて、代表的な応用例として以下に紹介する。

3.1. 課題の設定

原子力プラントの概略系統図を加圧水型原子炉(Pressurized Water Reactor; PWR)の場合につき図-1に示した。原子炉で核分裂により発生される熱は一次冷却水により蒸気発生器に導かれ、熱交換を行う。その結果、蒸気発生器二次側の冷却水が蒸気となってタービンに供給され発電が行われる。この基本メカニ

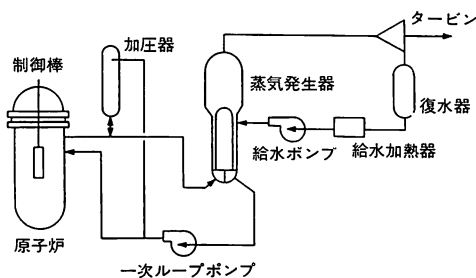


図-1 原子力発電所(加圧水型原子炉)の系統図

ズムは簡単であるが、熱出力が高く(大型炉では3000 Mw程度)蒸気発生器を含む一次冷却ループが複数系統設置されている。安全性確保の観点から非常時冷却系に代表される各種工学的安全設備が設けられており、しかも様々な系統に冗長化が施されている、機器の自動停止、隔離、インターロックなどが多用されている等々の理由により実際の系統は極めて複雑なものとなっている(主要な系統だけで200を越えるのが実情)。運転員が監視制御を行う操作コンソールには、数百から千を越える警報が設置されており、異常が発生した場合には対応する警報ランプが点灯すると同時に警告音により注意が喚起される。運転員はプラントの状態を確認し、異常の拡大波及の抑止と安全性の確保のため適切な操作を行うことを要求される。大多数の事象に対しては運転員は十分に対応できるように学習訓練を積んでいるが、安全性のより高いレベルでの確保を目指した場合、系統の複雑さを考えれば作業遂行は常に容易とはいえない。先端的計算機技術を応用して運転員の作業負担を軽減する支援システムの開発は、それにより2. で述べた問題点が回避できるという意味で意義が大きい。各種事象発生時のプラントの挙動については、熟練運転員はもとより設計技術者、安全解析技術者、関連学術部門の専門家などが膨大な知識を保有している。これらの知識を何等かの方策で抽出、整理、記憶して必要に応じて効率良く再生利用できるシステムを構築することが具体的な課題とされた。

3.2. 診断知識ベースの作成

熟練運転員らの診断に関する専門的知識は一般には言語表現によって記述されよう。これをインタビュー等により獲得、整理して概念的にまとめたものの一部を図-2に示す⁵⁾。専門家の能力はこのような知識の集積に依存するところが大きいゆえこのような知識ベースを適切な方法で構築することが運転員支援システム作成の最重要課題といえる。

図-2のような診断用知識を計算機向きに表現する方法としてはIF(条件aが成立) then (事象xが生起している)といういわゆるプロダクションルール形式が広く利用される。この形式は素朴ではあるがこれにより専門家の知識の相当大きな割合を記述することが可能であるため様々な分野で広く利用されている。図-2の任意の原因事象または中間事象に着目すれば、対応するプロダクションルールは

(1) 条件 $a_1 = [1 \text{ 次系インベントリ減少かつ} 2 \text{ 次系インベントリ増大}]$ 成立ならば

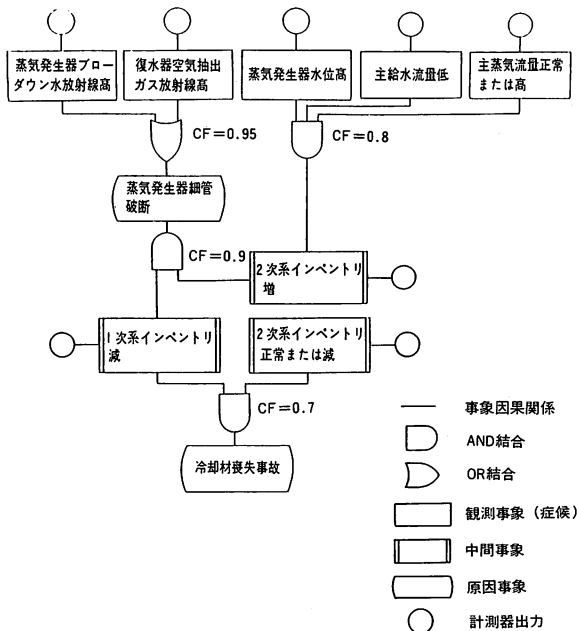


図-2 診断用知識概念図

事象 x 1 = [蒸気発生器細管破断] 生起
 (2) 条件 a 2 = [蒸気発生器水位高かつ主給水流量低
 かつ (主蒸気流量高あるいは正常)] 成立ならば

事象 x 2 = [2次系インベントリ増大] 生起
 のように容易に表現できる。なお図中の CF という記号は確信度 (Certainty Factor) と呼ばれる量で、ルールそのものの確実度の目安を与えるものである⁴⁾。多くの場合この値も専門家の経験的判断によって与えられ、その意味では主観的な量であるが、推論結果の信頼性を評価する手段として利用されることが多い。

このような知識を実際に計算機に格納するにはそれなりの工夫が必要である。よく知られた計算機言語である FORTRAN を用いて上記のルールの表現を試みると

```
(1) IF(WINV2.EQ."HIGH".AND.WINV1.EQ."LOW") THEN(SGTRUP.EQ."TRUE")
(2) IF(SGLV.GT.SGLVH.AND.FWFL.LT.FWFL.AND.STFL.GE.STFL)THEN(WINV2.EQ."HIGH")
```

のようになろう。これと等価な内容を代表的なAI的言語である PROLOG で記述すれば以下ようになる。

```
(1) Sgrupt : -Waterinv2hi, Waterinvlow
(2) Waterinvhi : -Sglevhi, Fwflow, Stflhil
PROLOG 言語の説明は本稿の目的外なので省略するが、上の表現で :- の左辺がそのルールの結論、右辺は
```

条件節を表していること、カンマ(,) による区切りは論理積(AND)を意味していることに注意すれば、形式的な対応関係は容易に理解されよう。これら2種類の表現方式の間には、見掛け以上に大きな違いが存在し、後者の方が以下の諸点において専門家知識処理に適合した望ましい性質を有している。

(a) 記述の簡明さ：
 直観的に明らかのように記述が簡単で判りやすく知識入力、内容吟味確認等における所要労力が少なく済む。

(b) 知識表現のモジュール性：
 実際に上のような知識に基づいた推論操作を行う場合、PROLOG 式では推論結果は知識記述の順序には基本的には無関係である。これは知識の本質として当然満足さるべき条件であるが、FORTRAN などではこの条件は成立していない。(2)' は(1)' に先立って記述されていないと(1)' のルール適用の際には(2)' の条件は常に不成立として扱われてしまうことになる。また新しい知識(ルール)の追加もPROLOGでは全体に影響を与えることなく可能であり、ソフトウェア保守上も有利である。

(c) 知識と推論の独立性：
 (1)', (2)' のような記述は診断ルールすなわち知識の実体であり、その利用法は推論方式を変えることで様々に変更修正が可能である。観測事象を与えて原因事象を推定する作業と、ある原因事象が生起していると仮定してその時観測されているべき観測事象は何かを調べる作業とを、知識データを変更することなく行えるため、知識の利用およびソフトウェア開発の効率が大巾に改良される。FORTRAN では要求機能毎にプログラムを作成しなければならない。

(d) 推論結果の事後説明機能：
 PROLOG を始めとする AI 向き言語では、推論の結果を得た場合にその結果を導くに至った理由を筋道立てて説明する機能が組み込まれている。この機能は専門家の経験的知識を非専門家に提示伝達する際に極めて有効な役割を果たす。

3.3. 実用的診断支援システムの構築

以上のような利点が2. で述べた在来技術の限界克服のため望ましいものであることはいうまでもない。AI技術、知識工学技術を基礎とした診断技術開発が盛んに試みられているのはこの理由による。技術の実現性は十分に確認されたといえる段階にあり、各研究機

関でプロトタイプ構築と動作検証は完了している。ただし産業現場での実用性をより高いものとするためには次のような諸課題の解決が重要である。

- (i) 知識の獲得の効率化：
- (ii) 深い知識の利用：
- (iii) ユーザーインターフェースの改良

課題(i)の意味するところは次の通りである。プラントが前述のように大規模なものであることから、システムが記憶保有すべき知識の量は必然的に膨大なものとなる。熟練運転員のインタビューなどのような方法では所要労力が大であり、考え落としの可能性も無視できない。経験していない事象は見落される危険も大きく、何等かの対応策が必要である。プラントをサブシステムに分割し、それぞれについて（異常、症候）を調べていくというのが現実的なアプローチであろうが、このサブシステムの設定自体、異常と症候とのプロセス内伝播特性に密接に関係するため簡単ではない。故障物理モデルと近似精度の良いシミュレーションコードを併用して効率良く診断用知識を獲得するような方策などが必要と思われる。

課題(ii)はこのような技術的展開とも関連して論じられねばならない。必要な知識をすべてルールで陽に記述表現しておくことが必要かつ効率的である保証はない。このようなルールの表現を浅い（表面的な）知識と呼ぶが、知識のタイプをこの範囲に限定すると診断もれを起さぬよう十分詳細な知識を確保しようとするればするほど必要知識量は増大し、(i)で述べた困難に一層拍車をかけることになる。能力の高い専門家であれば、過去に直接経験したことのない事態に直面しても対象プラントの構造とその中で生起している物理的プロセスに関する知識に基づいて適切な診断を行えるはずである。このような診断を前述のルール依存診断と対比して深い知識による診断と呼ぶが、同様な情報処理を計算機により行わせることが上に述べた困難回避の有力手段と考えられる。これに関連した研究として常識推論、定性推論などの試みがなされている^{6)~8)}。

(iii)で指摘したユーザーインターフェースの重要性も過少評価されてはならない。診断という作業は本質的に非日常的かつリスクを内包した状況への対応であり、運転員の精神的ストレスレベルの増大は避けられない。このような状況下での利用に供される支援システムでは、ユーザーから見て操作法ならびに提示情報の解釈法にあいまいさがあってはならない。現在までに開発

されている診断支援システムはプロトタイプの性格ということもあってこの視角からの検討は必ずしも十分とはいえないのが実情である。他産業分野（航空宇宙等）での経験も取り入れた人間工学的配慮の行き届いたユーザーインターフェース開発が強く望まれる。

4. その他の適用例

原子力プラントにおける技術的困難の克服にAI技術を応用した実例として異常事象診断支援を取り上げ、AI応用の基本的な考え方と現状を説明した。対象とする課題によってはかなり異なったアプローチも必要となる。本節では診断以外のテーマに対する適用例につき、前節では言及できなかったAI応用の側面を紹介したい。

4.1. 設計支援システム

診断作業の内容は分析と分類であるが、これと本質的性格を異にする作業に設計がある。ここでは目的とする仕様を満たす実体を合成することが中心課題であり、AI技術によりこの作業を支援する場合には診断の場合とは異種の配慮が必要となってくる。以下ではプラント内配管経路計画設計（ルーティング）支援システム⁹⁾の場合を例にとり、その開発の現状と問題点を概観する。

原子力プラントではその構成要素である配管の数は極めて多く規格も様々であり、かつそれらが空間的に高い密度で設置されるという特長を有する。この配管経路の計画設計は経験的知識に強く依存する形で従来は行われてきている。配管経路を満たすべき仕様が配管ごとに異なり、しかもその仕様が客観的確定論的に定まるのではなく設計者のもつクライテリア（設計基準やノウハウ）により定まるため、従来型の計算機技術による支援システム開発は困難であった。この設計

表2 配管経路決定クライテリアの例

クライテリアのタイプ	実 例
通過不可領域 経路周辺の間隔	薬品系配管の通路上通過禁止 低線量配管は分解作業区域から 2,500mm以上離す 大口径配管は他機器等から 300mm以上離す
経路の方向	蒸気ドレン配管は下降部に続く 直管部の後で上昇禁止
直管部長さ	分岐の上流側には配管口径の3 倍以上の直管部確保

クライテリアの例を表2に示すが、数値演算機能中心の考え方では対処しにくい知識であることが理解されよう。経験的知識の利用を可能にするAI技術の応用によりこの種の問題に対しても新しい計算機利用可能性が生まれた訳である。

具体的には次の手順が採用されている。

- (1) クライテリアをルールで整理記憶する。
- (2) このルールにつき推論過程を介して経路探索条件(問題解決手順、制約条件、評価基準)に表現しなおす。その表現はフレームという、階層的なデータ構造記述に適合性の高い一種のテーブル形式に要約される。
- (3) レイアウト対象となる空間を領域分割し、領域要素を数え上げる手法で経路を決定する。この際、(2)で導いた探索条件が反映される。

ステップ(3)だけに着目すればこの作業は在来型の配線経路決定問題などと類似したものといえる。しかしながらAI技術に基礎をおくステップ(1)、(2)の過程を含めることではじめて従来は考慮できなかった経験的知識情報の利用が可能となり、実用的な支援システムが構築されたことを強調したい。経路探索の最適化アルゴリズムを実行中にフレームの形で表現された制約条件、評価基準がダイナミックに利用され、結果として経験的知識が経路決定に反映される訳である。このシステムの利用により配管経路計画作業が従来までの方法に比べ約半分の時間で済み、経路の長さも短縮されたことが報告されている。

4.2. 燃料交換機運用計画支援¹⁰⁾

原子力プラントのエネルギー源である核分裂性物質(通常はウランウム-235)は、原子炉の運転につれ次第に減少し、連鎖反応の維持は次第に難しくなる。このため約1年毎に1度、炉を停止して一部の燃料体を新燃料に交換するが、更にこの際原子炉の運転特性と燃料燃焼効率を適切に保つため燃料体の再配置も行う。代表的な沸騰水型原子炉の場合では燃料体は760本程度、その内約1/4が新燃料に交換されるが、再配置も考慮するとほぼ全部の燃料体の位置変更を行う必要がある。燃料体の移動作業は燃料交換機と呼ばれる装置を用いてなされるが、初期配置に対して目的とする配置パターン(これは別途計算で与えられる)が図-3に例示するように確定していても、その実現手順は無数に存在する。最も効率良く目的配置を実現できるよう作業計画すなわちこの交換機の運用手順を適切に定めることがここでの課題である。

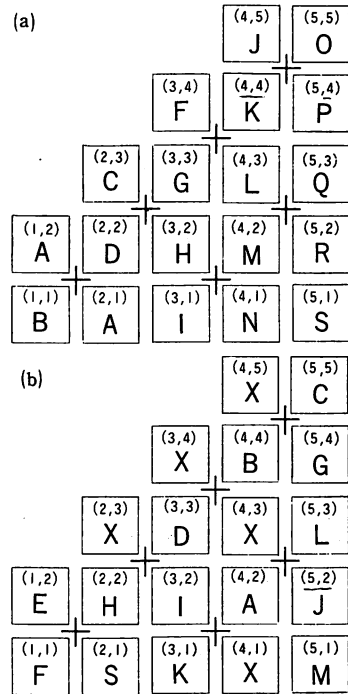


図-3 燃料体配置;ただし炉心の一部のみ示した
(a) 初期配置 (b) 目的配置

この問題も基本的には数理計画法による求解が可能である。しかし現実には

- (1) 炉停止余裕の確保
 - (2) DBG(Double Blade Guide)の使用法
- といった点に関し熟練技術者の知識が必要とされる。

燃料体の間には図-3で十字マークで示した位置に、中性子を吸収して炉内核反応の生成量を制御するための制御棒という装置が設置されている。(1)は燃料移動中に過渡的にであっても1本の制御棒のまわりに劣化程度の小さい(すなわち核反応を起しやすい)燃料が集中することを禁止するルールである。(2)のDBGとは、制御棒を囲む燃料体を2本以上取り除いた時に制御棒が倒れてしまうことを防止する装置であるが、これを利用する際に、燃料体の除去パターンが一定のルールを満たすことが要求される。これらの現場的ルールを制約条件として考慮しつつ燃料体移動手順を決定することは従来法では困難であった。この問題を代表的なAI言語であるPROLOGを用いて表現すると、PROLOGが本来有している再帰的表現能力とバックトラック機能により効果的に解くことができる¹⁰⁾。この例の場合は専門家の知識そのものをルール化する作業は行っていないが、複雑な制約条件付の計画決定問題が

AI分野で開発された技術の適用によって簡単に解くことを実証できた代表例として紹介した。

4.3 保守作業支援¹¹⁾

保守保全作業もまた原子力プラントにおいて多数の熟練した専門家を必要とする知識集約型作業である。定期点検、事後保全を含め保守作業の対象となる機器の数は極めて多くかつその種類も様々である。これに伴って保守専門家の利用する知識の内容も多岐にわたることになり、作業支援システム開発には以下の技術開発が前提となる¹¹⁾。

- (1) 機器の構成、点検交換の手順、故障の因果関係などの知識の表現方法。
- (2) 故障原因の推定方法。これには機器毎の故障発生確率の考慮、冗長系の故障原因推定、複合事象に対する故障原因推定など困難な課題が含まれる。
- (3) 同定された故障に対する修理、交換時期選択基準の設定法。

(1)に指摘した多様な知識の表現手段としては4.1において紹介したフレームがここでも有効であることが確認されている。これにより、個々の機器故障毎に、機器名、故障内容(事象、観測可能性)、当該故障の誘起原因、波及効果、発生確率、点検手順、交換手順などが構造化された形式で一括して表現され、多数の機器故障に関する詳細な知識の登録、検索、修正、更新が容易に行える。このフレームには故障事象相互、ならびに観測事象と故障の間の因果関係ネットワークに相当する知識も貯えられているので、これをたどって原因推定を行う作業は3.で診断に関し説明したと同様にIF~THEN~型ルールの適用によって可能となる。また主観的確信度と故障発生確率とを併用することで、熟練作業員が行う経験に基づいた故障原因判断と同等の処理も実現された。このシステムを制御棒駆動系の保守に適用した場合のルール数、フレーム数はそれぞれ約500、350であり、計算所要時間は15MIPSの計算機で平均30秒程度と報告されている。保守診断ではこの所要時間は実質的に問題ではないが、対象システムを拡大していく場合には知識の入力を容易にし、かつ誤り検出を可能にする手段の開発が重要となろう。

5. おわりに

原子力プラントの安全性向上を目的として現在積極的に試みられているAI技術導入の現状を紹介し、具体的課題の解決のため採用された種々の方策と、それによって実現されたシステムのパフォーマンスについ

て概説した。AI技術は今後の発展の余地が極めて大きい若い技術である。本稿で示した例は開発の実情を反映してAIの一分野である知識工学の応用に片寄っているが、場面理解、音声認識、構文解析等、より広いAI技術応用の試みも着実に進んでいることを付記しておきたい。現段階でも多様な応用が可能となっている実情をみれば、この技術が在来の計算機技術での対応が困難とされてきた多くの問題に対し近い将来強力な手段を提供するようになることは確実であろう。ただしAI技術の産業現場応用の一層の進展のためには、いくつかの重要技術開発が急務である。これについては紙数の関係で言及できなかったが興味ある読者は別報¹²⁾を御参照いただきたい。本稿が他の産業分野でAI技術導入を考えておられる読者の何等かの御参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 白井良明, 辻井潤一; 人工知能, (1982), 岩波。
- 2) フェイゲンバウム編, 田中幸吉, 淵一博監訳; 人工知能ハンドブック, (1983), 共立。
- 3) 三浦武雄, 大須賀節雄他; 特集「知的情報処理」, 計測と制御, 25巻, 4号(1986), 297-379。
- 4) Shortliffe, E.H.; Computer-Based Medical Consultation: MYCIN(1976), American Elsevier。
- 5) 佐伯 昭, 峰尾佳幸, 荻野敏道; SICE第3回知識工学シンポジウム資料, (1985), 23-379。
- 6) De Kleer, J., Brown, J.S.; Artificial Intelligence, 24,(1984), 7-83。
- 7) Kuipers,B.; Artificial Intelligence, 24(1984), 169-203。
- 8) Washio,T., Kitamura.M., Sugiyama.K.; Control-Theory and Adv. Tech., 2,(1986), 433-449。
- 9) 小林康弘, 木口高志, 満田 透, 和田 裕, 好永俊昭; 日立評論, 67, (1985), 49-52。
- 10) Sekimizu.K., Araki.T., Tatemichi.S.; Nucl. Tech (1987), to appear in November issue。
- 11) 氏田博士, 木口高志, 小野寺勝重, 駒田正興; 日本原子力学会誌, 29, (1987), 538-547
- 12) 元田 浩, 荻野敏道, 関水浩一, 篠原慶邦, 北村正晴; 日本原子力学会誌, 28, (1986) 794-805。