研究論文

996. 類似事例の有効利用によるプラント挙動概略の 知的推定法

五福明夫*, 沼本 敦*,†, 吉川 榮和*

(1993年 6月23日 受理), (1993年 11月4日 再受理)

*Intelligent Method of Plant Dynamics Behavior Estimation
by Effectively Applying Similar Cases*

By Akio GOFUKU,
Atsushi NUMOTO and Hidekazu YOSHIKAWA

In order to accomplish efficient execution of a dynamic simulation of engineering systems, it is important to construct suitable mathematical models for the simulation. In the construction of the mathematical models, it is necessary to estimate the system's behavior to suppose the phenomena which are needed to be modeled. The case-based reasoning is considered to be a powerful tool to estimate the outline of system's behavior because we often estimate it from the similar cases which are stored as our experience or in literature. In this study, the technique based on similar cases is investigated to estimate the outline of time-responses of several important variables of pressurized water reactor (PWR) plants at a small break loss of coolant accident (SBLOCA). The registered cases in case base are gathered from various reports and the authors' numerical simulations related with SBLOCA of PWR plants. The functions to use in the case retrieval are formed from the characteristic features of SBLOCA of PWR plants. On the other hand, the rules to use in the case refinement are obtained from the qualitative and quantitative consideration of plants' behaviors of the cases in the case base. The applicability of the technique is discussed by two simple estimation trials of plant behavior.

KEYWORDS: case-based reasoning, plant behavior, mathematical models, numerical simulation model, PWR type reactors, nuclear power plants, loss of coolant

I. はじめに

近年、物理現象の解明と数値シミュレーション技術の進展により、数値シミュレーションが、種々の工学システムの設計や安全性解析において、従来のように実験を補完する形態ではなく、むしろ主として利用されるようになってきている。一部の分野においては「コンピュータ物理の世界」として、数値シミュレーションへの期待が高まっている⁽¹⁾。このような状況にあって、超並列マシンなどの新しいコンピュータ技術による数

値シミュレーションの高速化、大容量化のみならず、急速に進歩している人工知能技術やインタフェース技術を応用することにより、効率や信頼性を向上させるための数値シミュレーションの高度化が求められている。

工学システムの数値シミュレーションにおいては、目的や条件と合致した数値シミュレーションモデルを構築することが重要である。例えば、加

* 京都大学 原子エネルギー研究所 (Inst. of At. Energy, Kyoto Univ.)

† 現在、住友電気工業(株) (Sumitomo Elec. Ind., Ltd.)

圧水型原子力プラント(以下、PWRプラント)の安全性解析において、通常運転時には液相である1次系ループ内の冷却材が沸騰を起こさない範囲(例えば、蒸気発生器細管の破断の場合)で、プラント1次系の挙動を詳しく解析しようとする場合には、冷却材のモデルとしては単相のみを扱えるもので十分である。減圧により沸騰が生じた状況をも模擬する場合(例えば、コールドレグなどの1次系配管の破断の場合)や2次系挙動を扱う場合には、気液二相流を扱えるモデルを選ぶ必要がある。

このように、解析の目的に応じて用いる数学モデルが異なったものになる。また、用いる数学モデルによって解析プログラムの適用範囲、精度、計算コストがそれぞれ異なる。このため、数学モデルの設定は、原子力プラントのような核反応、熱流動などの広い領域にわたる複雑大規模な工学システムにあっては、解析者は広い分野にまたがる専門知識と柔軟な問題解決能力が要求される。したがって、数学モデルの設定作業を支援するシステムを知識処理技術を応用して構成することは、解析者の負担を軽減するとともに数値シミュレーションの効率化に寄与できる。

このような観点から、著者らは、数値シミュレーションの目的や条件と一致した数値シミュレーションモデルの構築を支援するエキスパートシステムについて検討している⁽²⁾⁽³⁾。

数学モデルの作成には、その数値シミュレーションにおいてモデル化すべき現象を注意深く取捨選択する必要がある。一方、どのような現象をモデル化するか、また、その現象のモデル化方法によって数値シミュレーションの精度やコストにどのような影響があるかを知るためには、対象としている工学システムの挙動がある程度推定できる必要がある。しかし、これまでのモデル選択支援システムの開発においては、プラント挙動の概略は、すでに推定できているものと仮定していた。プラント挙動の概略は、定性シミュレーション⁽⁴⁾によっても推定できると考えられる。しかしながら、専門家によるモデルの作成過程では、定性的な考察とともに、過去の経験や文献に報告されている類似のシミュレーションの結果を参考にして対象システムの挙動を推定し、モデル化す

べき現象や採用すべき数学モデルの検討を行なっていることが観察される。

このような専門家の思考形態は近年、注目されている推論手法である事例ベース推論(Case Based Reasoning: CBR)⁽⁵⁾⁽⁶⁾と非常に類似している。また、類似のシミュレーションや実験などの結果からのプラント挙動の推定をシステム化することは、文献などに報告されている多くの事例を利用できる点で有利と考えられる。ここで、事例中に格納されているプラント挙動の修正ルールは物理法則に基づいて比較的容易に獲得できると考えられる。

そこで、本研究では、プラント挙動概略の知的推定法の構成にCBRの適用性を検討した。CBRシステムは一般に、事例ベース、事例検索器、事例修正器、事例格納器から構成される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本報ではこれらのうち、事例ベース、事例検索器、事例修正器からなる、類似事例に基づいたプラント挙動概略推定法の適用性について論じる。

CBRシステムは、これまで、法律、経済分野での問題解決システム、工学、医学分野での診断システム、設計支援システムや自然言語処理システムなどに応用されている^{(7)~(11)}。また、これらの応用例では、類似事例の解決法を利用するか、類似解決事例に経験的ルールが適用されている。一方、著者の知る限り、工学システム挙動の数値シミュレーションにCBRを応用した研究はない。工学システムの数値シミュレーションでは、ある特定の1変数の変化がシステム挙動を表わす他の変数の挙動に直接的に影響を及ぼす範囲は比較的限定されていることが多い。本報では、これを「近接的影響」と呼ぶことにするが、本報の類似事例活用システムでは、ある変数が他の変数の変化に直接的に及ぼす近接的な影響のみを考慮して、物理法則に基づいて修正ルールを効率的に獲得している点に特徴がある。

以下、本報においては、第Ⅱ章で、本研究において検討した類似事例に基づいたプラント挙動の概略推定システムの構成について、第Ⅲ章で、作成したシステムの評価を行うために試行した2つの例についてその条件と結果を、第Ⅳ章 結論においては、本研究において得られた知見をまとめ

るとともに、本研究を発展させる上での課題について述べる。

II. 類似事例に基づいたプラント挙動の概略推定システム

本章では、作成したプラント挙動概略推定システムの仕様、全体構成、事例ベースの構築、キーワード評価による最適事例の検索および検索された事例の修正について述べる。

1. 全体構成

本プラント挙動概略推定システムは、モデル選択支援システム⁽²⁾において必要となる、プラント挙動の概略に関する情報を提供するものとして開発した。まず本節では、モデル選択支援システムが要求するプラント挙動の概略とは何かを述べ、プラント挙動概略推定システムの仕様について考察した結果を述べる。その後、この仕様に基づいて作成したシステムの構成を、一般的なCBRシステムと対応させて述べる。

モデル選択支援システムでは、まず解析者が数値シミュレーションを実施するに当たっての目的や条件を取り込む。そして、流体モデル選択部では、PWRプラント1次系の炉心やホットレグ、蒸気発生器(Steam Generator: SG)などのコンポーネントごとに、どのようなシナリオ(スクラムの発生や安全注入系の作動など)でどのような現象(熱伝達や対向流など)をモデル化に際して考慮すべきかを判断し、解析精度や計算コストなどの点から最適な流体モデルを選択する。また、構成方程式選択部では次の3つの観点からの評価により、最適と判断される構成方程式を選択している。すなわち、①問題とする数値シミュレーションにおける流動条件(管径、流体の圧力、流れの方向など)と、構成方程式を導く基になった実験での流動条件の類似度、②精度、③構成方程式の複雑さである。

流体モデルおよび構成方程式の選択を行うために必要な情報をまとめると、(i)どのようなシナリオでプラント状態が推移していくか、と(ii)プラント各部での圧力、流量、ボイド率である。これらのうち(i)のシナリオとは、圧力などのプラント変数が設定点に至ることによる安全系の作動や運転

員操作を時間順に並べたものであり、プラント安全系の作動条件はプラント設計情報より既知であるから、結局、(i)の情報はプラント変数の時間変化を推定することにより生成できる。また、冷却材の流れが止まらない限りはプラント内での圧力、流量やボイド率の分布はそれほど大きくはない。

このような点から、本研究ではPWRプラントの運転において重要なプラント変数を代表するものとして、第1表のような8つの変数を推定するものとした。また、本プラント挙動概略推定システムへの入力としては、PWRプラントの1次系小破断事故を分類できるものとして、モデル選択支援システムに入力する解析者の目的や条件のうち、(a)対象とするPWRプラントの形式、(b)対象とするPWRプラントのSBLOCA(小破断冷却材喪失事故)の形態、(c)解析する時間帯、(d)SBLOCA前の原子炉出力、自動操作や運転員操作といった運転条件とした。

第1表 時間変化を推定すべきプラント変数

カテゴリー	プラント変数名
圧力	加圧器圧力
水位	加圧器水位
流量	炉心流量 破断流量
ボイド率	炉心ボイド率 おのおののループのホットレグボイド率 おのおののループのSG1次側ボイド率 おのおののループのコールドレグボイド率

一方、本システムに要求される推定精度としては、全般的なプラントの時間変化の挙動が定性的に正しく、また、定量的にはイベント発生などのプラント状態が推移していくタイミングやプラント変数値の真値との相対誤差が30%程度以内を目標とした。すなわち、目的とする最適な数値シミュレーションモデルの構成には、どのような現象が起こり得て、それがどのくらいプラント挙動に影響するかの確認が必要であり、数値解析の精度向上は得られた数値シミュレーションモデルによる数値計算で達成されるので、本システムでの要求推定精度は上述のような条件とした。

そこで、システムの全体構成を第1図のように設計した。事例ベースには、典型的と考えられる

14のPWRプラントのSBLOCAにおけるプラント挙動の概略が蓄えられている。事例検索器では、問題とする数値シミュレーションと事例ベースに格納された事例との類似性を第Ⅱ-3節(後出)で述べる6つのキーワードに対する評価値により判断し、最も類似していると判断される事例を選択する。また事例修正器では、検索された事例を修正して問題とする数値シミュレーションにおけるプラント挙動の概略を推定する。事例修正器は、第1図に示すように、「変数の代替」と「変数の時間変化の修正」の2つの部分から成り立っている。これらの詳細については、第Ⅱ-4(1)、-4(2)項で述べる。一般的なCBRシステムにおいては、推論が成功した場合には解決事例も新たな事例と考えられることから、これを事例格納器を経て事例ベースに登録することが行われている⁽⁶⁾。

第1図 プラント挙動推定システムの構成

本システムでは、プラント挙動の概略を推定しており、その正しさは実際に数値シミュレーションを行わないと判断できないので、事例格納器は設けていない。一方、推論が失敗した場合には、その失敗を繰り返さないため、事例修正器で失敗原因を追求した上で、事例格納器を経て事例ベースに失敗事例として登録されることがよく行われている⁽⁶⁾。本システムにおいてもそのような仕組

みを設けるべきと考えるが、失敗の判断基準がいまいちなこともあり、現在のところ失敗事例の登録は行なっておらず、今後の課題である。

なお、本システムは、パソコン(Apple社Macintosh)上に、HyperCard 2.0J⁽¹²⁾を用いて作成している。したがって、事例ベースは第Ⅱ-2節で述べるように、カードの集まりとして構成し、類似性評価や修正のためのルールは、オブジェクト指向言語に分類されるHyperTalkにより記述している。

2. 事例ベースの構築

前節で述べた仕様を満たすため、事例ベースには第2表に示す14のPWRプラントのSBLOCA事例を収録した。第2表では、事例番号、事例名とともに、事例検索器で用いる6つのキーワードのうちの、プラント設計メーカー、SBLOCAの条件(破断場所、破断口径)および収録したプラント挙動の時間帯を示している。事例ベース中の事例の収集は、不幸にして発生した実プラントにおける事故のレポートや安全性解析に関する文献^{(13)~(15)}、また著者らの行なった原子力プラント安全性解析コードRELAP4/MOD6⁽¹⁶⁾やRELAP5/MOD1⁽¹⁷⁾による数値シミュレーション結果⁽¹⁸⁾に基づいて行なった。

第2表に示したおのおの事例の内容は、(1)各事例の特徴を記述した「事例特徴データ」、(2)その事例におけるプラント挙動を記述した「プラント挙動データ」、(3)プラント挙動の原因となった事象の発生を記述した「事象発生時間データ」、の3つのデータから構成した。

「事例特徴データ」は、後述するように、問題とする数値シミュレーションと、事例ベース中の事例との類似性評価や事例の修正に用いられる。「事例特徴データ」のキーワードとしては、①事例に格納されているプラント挙動データの外挿性についての情報を与えるデータの収録法、②PWRプラントに発生した起因事象に関するもの、③PWRプラントの設計条件を大まかに表わすもの、④起因事象発生時の運転条件に関するもの、⑤その他特記事項として、プロセス制御系や2次系の構成など、本研究で対象とするSBLOCA

第2表 事例ベースに登録した事例

番号	事例名	プラントメーカー	破断場所	破断口径	時間帯(s)
1	Trojan SBLOCAc1	WH	コールドレグ	0.05 ft ² 非常に小と小の間	0~400
2	Trojan SBLOCAc2	WH	コールドレグ	0.125 ft ² 中	0~400
3	Trojan SBLOCAc3	WH	コールドレグ	0.25 ft ² 大	0~400
4	Trojan SBLOCAh1	WH	ホットレグ	0.05 ft ² 非常に小と小の間	0~400
5	Trojan SBLOCAh2	WH	ホットレグ	0.25 ft ² 大	0~400
6	ref CESBLOCA1	CE	コールドレグ	小	0~1,000
7	ref CESBLOCA2	CE	コールドレグ	中	0~1,000
8	ref CESBLOCA3	CE	コールドレグ	大	0~1,000
9	Prairie SGTRA	WH	SG細管	0.005 ft ² 非常に小	0~3,200
10	BWSBLOCA	B&W	コールドレグ	0.0012 m ² 非常に小と小の3:1の内分点	0~5,000
11	ref WHc SBLOCA1	WH	コールドレグ	0.04 ft ² 非常に小と小の間	0~2,500
12	ref WHc SBLOCA2	WH	コールドレグ	0.16 ft ² 中と大の間	0~1,100
13	TMI2 accident	B&W	PORV	0.006 ft ² 非常に小	0~1,000, 0~10,000
14	ref CESGTRA	CE	SG細管	0.005 ft ² 非常に小	0~5,000

破断口径の欄において、言語的表現は、第3図の「破断口径」に対する評価関数の入力値。

事象ではあまりプラント挙動に影響を及ぼさないものの記述、の5種類のカテゴリに対して、第3表に示すような計15のキーワードを選び、「事例特徴データ」にそれらのキーワードに対する値を格納している。

第3表 事例を特徴づけるキーワード

カテゴリ	キーワード名
データの収録	収録されたプラント変数名 時間変化データの収録時間帯 データの作成方法
小破断LOCAのタイプ	事故のタイプ 破断場所 破断口径
プラント設計条件	設計メーカー ループ数 定格出力 定格1次冷却材流量 SG形式
運転条件	プラント安全系の動作条件 小破断発生前のプラント出力 運転員操作
その他	特記事項

一方、「プラント挙動データ」には、本システムの仕様から、第1表に示すような8種類のプラント変数について、その時間変化を時間-値のテ-

ブル形式で収録している。しかし、事例ベースの作成において参照したレポートや文献などでは、上記のうち幾つかの変数が報告されていなかったり、代わりに類似の変数が報告されていることもあり、推定すべきプラント変数の時間変化に関するデータが事例中がないという問題があった。そこで、本システムでは第II-4(1)項で述べるように、変数の代替を行うことによりこの問題に対処している。

実際のHyperCard上での事例ベースは、1事例当たり「事例特徴データ」が8枚、「プラント挙動データ」が各変数当たり1枚、「事象発生時間データ」が1枚のカードで構成している。それぞれのデータの例を第2図(a)~(c)に示す。

3. 最適事例の検索

一般にCBRシステムでは、新たな問題と事例ベース中の各事例がどれだけ類似しているかを、それぞれの対応するキーワードの値を比較することによって判断している。キーワードとしては、各事例を最もよく区別あるいはグループ化するものを必要かつ最小限に選び、また適切な類似性評価関数を設定することが重要である。本研究の場合、PWRプラントのSBLOCA時の1次系挙動

<1> データ形式

1. 収録時間帯 0 - 400 秒

2. プラント実験 加圧器圧力, 加圧器水位, 破断流量, 炉心流量, 炉心
ボイド率, SG1次側ボイド率, コールドレグボイド
率

3. データ作成方法 REFL4/MOD5Eによる計算機シミュレーション

4. 参考文献 ANCR-NUREG-1335

New Cards Prev data Prev Next Next data

WH

4

2400MWt

9215.28LBM/sec, ループ

加圧器飽和温度 652.05838F

1142 C

1026.5 C

U字管型

SG飽和温度 516.6 F

9. SG形式

10. 二次系圧力

U字管型

SG飽和温度 516.6 F

(a) 事例特徴カード

事故名 TrojanSBLOCAh1

破断口径 0.0046 m2

時間(s)	加圧器圧力(atm)	発生事象
0	150	
50	122	スクラム
60	82	
400	75	

LOCah1

6 m2

加圧器水位(m)	発生事象
9.4	
0	
0	

(b) プラント挙動カード

事象の発生時間

事例名 TrojanSBLOCAh1

修正の根拠となる事象	その開始時間 (s)
スクラム	50.0
一次系ポンプ停止	50.0
給水ポンプ停止	51.0
主蒸気弁閉	51.0
ECC charging 注入開始	74.3
HPIS注入開始	78.8

(c) 事象発生時間カード

第2図 事例のカード構成

の推定を対象としている。したがって、対象とするPWRプラントの形式や大きさ、安全系の動作条件、SBLOCAの条件、オペレータによる手動操作が類似性を評価する項目になると考えられる。そして、キーワードの選択では、事例を特徴づけるキーワードを分析し、(1)同じような意味を持つキーワードをグループ化して、それらの中に一つに代表させる、(2)細かい差異を表わすキーワードについては、事例の修正において考慮する、との方針により、以下に述べる検討の結果、第4表に示す6つのキーワードを選んだ。

第4表 事例検索に用いるキーワード

番号	キーワード名
1-1	破断場所
1-2	破断口径
2	SG形式
3	時間変化データの収録時間帯
4	ループ数
5	小破断発生前のプラント出力

まず、プラント形式については、キーワード「SG形式」の値により評価することとした。これは、原子力プラントの場合は、設計メーカーが同じであればほぼプラントの構造や自動制御系、安全系の動作条件が同じであり、さらに、PWRプラントの場合にはSGの形式により設計メーカーのグループを特定できるためである。現在、事例ベースに登録されている事例数は14とそれほど多くなく、またプラントの改良などによる安全系の動作条件の違いも大きくはないので、安全系の動作条件の違いは事例の修正において考慮することとした。また、プラントの大きさはキーワード「1次系のループ数」により評価できる。

一方、SBLOCAの条件は、1次系ループ内において小破断の生じた場所と破断の大きさにより評価できるので、キーワード「破断場所」、「破断口径」を選んだ。そして、事例に収められている「プラント挙動データ」の収録時間帯を大きく越えての時間帯にわたるプラント挙動の推定は行えないことから、キーワード「収録時間帯」を事例の適用性の一つの指標に選んだ。さらに、SBLOCAの発生する前のプラント出力によって、破断の場所

や大きさが同じであってもSBLOCA発生後のプラント挙動が異なるので、キーワード「初期出力」も類似性評価のキーワードに加えた。

以上の6つのキーワードそれぞれに対して第3図に示す類似性評価関数を構成した。第3図におけるパラメータ $\alpha, \beta, \dots$ の決定は、第III章で述べるように、(1)事例ベース中の各事例の類似度の順序をあらかじめ決定した幾つかのテストケースを用意する、(2)このテストケースに対し、第3図中の式で計算した類似度値があらかじめ与えた類

(a) キーワード「破断場所」、「破断口径」に対する評価関数

(b) キーワード「SG形式」に対する評価関数

P3 / 100		対象とする問題		
		USG (WH)	USG (CE)	OTSG
USG	WH	1.0	ϵ	δ
	CE	ϵ	1.0	δ
	OTSG	δ	δ	1.0

(c) キーワード「時間変化データの収録時間帯」に対する評価関数

$$P_3 = 100 \times \frac{T_{\text{Target}} \cap \text{Case}}{T_{\text{Target}}}$$

(d) キーワード「ループ数」に対する評価関数

P4 / 100		対象とする問題		
		2 Loop	3 Loop	4 Loop
	2 Loop	1.0	$(1.0 + \zeta) / 2$	ζ
	3 Loop	$(1.0 + \zeta) / 2$	1.0	$(1.0 + \zeta) / 2$
	4 Loop	ζ	$(1.0 + \zeta) / 2$	1.0

(e) キーワード「小破断発生前のプラント出力」に対する評価関数

$$P_5 = 100 - 100 \times \left(\frac{P_{\text{Target}} - P_{\text{Case}}}{P_{\text{Target}}} \right)^2$$

第3図(a)~(e) キーワードに対する評価関数

似度の順序にあうように $\alpha, \beta, \dots$ を決定する、方策により求めた。評価関数構成の考え方は以下の通りである。

まず破断場所については、加圧器上部に設けられている開放弁(PORV)とホットレグ、コールドレグなどの1次系配管と、SG細管とに大別される。この中で、PORV 開固着の場合は破断後の流出流が気相であり、その他の場所での破断の場合のような液相ではないため、破断後のプラント挙動は大きく異なる。そこで、まず問題とするシミュレーションと事例での破断場所とがどちらもPORVの時のみ評価値が1.0となり、それ以外の組合せでは γ となるようにした。

一方、1次系配管とSG細管の破断の場合には、問題とするシミュレーションと事例での破断場所との流れに沿っての距離によって類似度がゆるやかに低減すると考えられるため、第3図(a)のような関数とした。例えば、問題とするシミュレーションでの破断場所がSG細管であり、ある事例での破断場所がホットレグの場合には、「破断場所」に対する類似度は、第3図(a)のホットレグのカーブ(実線)上のA点での評価値 α となる。

次に、キーワード「破断口径」については、プラントサイズによって同じ口径であっても破断後のプラント挙動が異なるので、破断の大きさを言語的に表現し、ファジイシステムにおいてよく用いられるメンバーシップ関数と同様の評価関数とした。キーワード「SG形式」により、代表的な設計メーカーであるWH(Westinghouse), CE(Combustion Engineering), B&W(Babcock & Wilcox)の各社を分類する。ここで、WHとCE社のSGはともにU字形であり、B&W社の直管形とは異なるので、類似度はWH(CE)とB&Wの組合せよりも高くなるようにした。

キーワード「1次系のループ数」については、ループ数の差に比例して類似度が下がると考えられ、第3図(d)のように評価関数を与えた。また、キーワード「収録時間帯」については、問題とするシミュレーションが対象とする時間帯と、事例に収められているプラント挙動データの時間帯とのオーバーラップする時間帯の比が小さくなるにつれて、外挿度が大きくなり適用性が低下すると考

えられるので、それに伴い類似度が下がるような関数形とした。さらに、キーワード「初期出力」についても、問題とするシミュレーションと事例での値との差に応じて類似度が下がると考えられるので、第3図(e)の関数形としている。しかし、2次関数とすべきかどうかについてはまだ検討の余地がある。これについては、今後初期出力が低い事例も事例ベースに登録していく過程で検討したい。

それぞれのキーワードに対する評価値を総合して、総合的な類似性評価値を与えるが、まず破断条件に対する類似性評価値 P_1 を

$$P_1 = P_{11} \times P_{12} \quad (1)$$

で与えた。ここで、 P_{11} , P_{12} はそれぞれキーワード「破断場所」、「破断口径」に対する評価値である。そして、総合的な類似性評価値を

$$P = \sum_i (w_i \times P_i) \quad (2)$$

で与えた。ここで、 P_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$)はそれぞれ破断条件に対する評価値、キーワード「SG形式」、「1次系のループ数」、「収録時間帯」、「初期出力」に対する評価値である。また、 w_i は評価値 P_i に対するキーワード間の重要度を考慮した重みである。

4. 検索事例の修正

類似性評価値により問題とするシミュレーションに最も類似性の高い事例が検索されるが、すでに述べたように、検索された事例中には必要となる一部の変数の時間変化が収録されていなかったり、類似の変数の時間変化により代用されている場合がある。このような場合には、「変数の代替」により、類似の変数から必要な変数の時間変化を推定し、代替された変数の時間変化から次に述べる「変数の時間変化の修正」により、問題とする数値シミュレーションにおけるプラント挙動を推定する。

(1) 変数の代替

「変数の代替」は、システム中に知識ベース化された「変数代替ルール」を用いて行う。「変数代替ルール」を第5表に示す。表において「代替なし」となっているものは、他の変数から簡単なルール

第5表 変数代替のルール, ヒューリスティック例

欠けている変数	変数の代替方法
加圧器圧力	(他のコンポーネントにおける 1次系圧力)+(静圧差)
炉心流量	$\sum_{\text{ループ}} (1次系ループ流量)$ または (他のコンポーネントにおける 1次系流量) $\times$ (ループ数)
破断流量	なし
ホットレグ ボイド率	炉心ボイド率

だけでは推定できない変数であることを意味している。各変数に対する「変数の代替」の基本的な考え方は以下の通りである。

まず圧力については, PWR プラント 1 次系における圧力分布はあまり大きくないので, 静圧差の補正だけで十分と考えられる。流量についてはループ数を考慮する必要がある。水位については基本的には代替は不可能であるが, 加圧器水位については炉心水位が低い場合にはゼロとしてよいと考えられる。しかし, 米国 TMI 2 号炉の事故では, 炉心水位が低下したことにより, 実際には加圧器水位があったにもかかわらず, 運転員が加圧器水位をゼロと見なしたことにより事態の悪化を招いたことから, TMI 2 号炉事故のような加圧器頂部での開放弁の開固着の場合には適用しないことにしている。

(2) 変数の時間変化の修正

前節で述べた「変数の代替」の完了した各変数の時間変化は, 事例ベース中から検索された事例におけるプラント変数の時間変化と考えられ, そのままでは問題とする数値シミュレーションでの変数の時間変化とすることはできない。そこで, 各変数に対し変数の時間変化の修正を行う。ここでは, スクラムなどの安全系の動作条件の違いによる動作時間のずれ, 安全系の作動やタービントリップなどの事象の発生による各プラント変数の変動, 安全系による注入量の違いによって引き起こされるプラント変数の時間変化率の違いを考慮して行う。

修正においては, まず安全系の作動および事象の発生がどの変数の時間変化に影響を与えるのか

の関係を知る必要がある。そこで, 事例ベースに収めた事例について, プラント挙動の定性的な分析を行い, 例えば, スクラムが入れば炉心発熱量が減少する, 炉心発熱量が減少すれば 1 次系圧力が減少し, かつ加圧器水位が減少するといった定性的な挙動の近接的な因果関係を集めた。これらの例を第 4 図に示す。

第4図 小破断冷却材喪失事故時のPWRプラントの定性的挙動の例

図において, 太線で囲まれたものは発生した事象を, 網掛けしたものは現象の変化を, 細線で囲まれたものはプラント変数の変化を表わしており, 矢印の左側が原因を, 右側がその結果である。これらの定性的なプラント挙動の因果関係ルールに基づいて, 事象の発生とそれが影響するプラント変数との関係をまとめてツリー表現したものが第5図である。例えば, スクラムが入れば, 1 次系圧力, 破断流量, 加圧器水位のいずれもが減少するといった具合である。第5図に示したような事象発生と影響する変数の関係は, 「事象変数因果関係知識ベース」として知識ベース化した。

修正の手順は以下ようになる。まず, 検索された事例の「事象発生時間データ」から, その事例でのスクラムなどの各事象の発生した時間を知る。次に, 各事象が発生した時に, どの変数を修正すべきかを上述の「事象変数因果関係知識ベー

第5図 発生事象と修正変数との対応の木表現例

ス」を用いることで明らかにする。各事例の修正は、(1)問題とする数値シミュレーションと事例における、発生した事象のプラント変数の時間変化への影響度や、(2)安全系の動作条件や手動操作の問題とする数値シミュレーションと事例との違いによって、プラント変数の時間変化のカーブが折れ曲がる時間や変化率を修正する。個々の変数の修正ルールおよびヒューリスティックは、事例ベースに登録したSBLOCA事例におけるプラント変数の時間変化を検討することにより導いた。これらの例を第6表に示す。

第6表 プラント変数の時間変化の修正のためのルール、ヒューリスティック例

I.D.	プラント変数	ルール、ヒューリスティック
P1	加圧器圧力	IF 小破断が発生しかつスクラムが入っていない。 THEN 減少率は破断口径の平方根に比例させる。
P2	加圧器圧力	IF 小破断の後スクラムが入り、かつ他のイベントが発生していない。 THEN 減少率は検索された事例のものと同じとする。
B1	破断流量	IF 小破断の後イベントが発生した。 THEN そのイベント発生後の流量の変化率は破断口径に比例させる。
F1	炉心流量	IF イベントが発生した。 THEN イベント発生後の流量の変化率は検索された事例のものと同じとする。

これらの修正ルールは知識ベース「修正ルール」としてシステムに格納している。

修正の実際を、第6図に示す加圧器圧力の時間変化を示すグラフを例にとり説明する。第6図において、細線は事例中に収録されている被修正対象の加圧器圧力の時間変化のグラフである。この事例では、スクラムの入る条件は加圧器圧力が12.0MPaまで低下した時点となっている。いま、問題とする数値シミュレーションにおける破断口径が事例の2倍であるとし、スクラム条件が、加圧器圧力が11.0MPaまで低下した時点であるとする。まず、「事象変数因果関係知識ベース」を参照することにより、加圧器圧力はこの事例で生じた1次系小破断とスクラム挿入により、影響を受けることを知る。そして、破断後の加圧器圧力の減少率は、第6表の加圧器圧力の修正ルールP1に従い、破断口径の比の平方根に比例した変化率となり、太線のカーブC1を得る。また、スクラムの入る時間は、破断後の加圧器圧力の時間変化のカーブが11.0MPaに至った時点(第6図のA点)と判断する。スクラム後の加圧器圧力の時間変化率は、第6表の加圧器圧力の修正ルールP2に従って、事例における変化率と同じとするので、太線のカーブC2を得る。このようにして、問題とする数値シミュレーションにおける加圧器圧力の時間変化を得る。

第6図 変数の修正例

III. プラント挙動概略推定の試行

本研究で作成したプラント挙動システムを評価するため、プラント挙動の推定の試行を行なった。例題として選んだ問題は、〔例題A〕WH社型

の4ループPWRプラントでのホットレグ小破断事故⁽¹⁹⁾と、〔例題B〕米国Ginnaプラントで発生したSG細管破断事故⁽²⁰⁾の2ケースである。システムの評価は、本システムにより推定されたプラント挙動と、〔例題A〕では著者らの行なった原子力プラント安全解析コードRELAP4/MOD6による数値シミュレーション結果、〔例題B〕では事故解析結果⁽²⁰⁾と比較することにより行なった。

問題とした2つの数値シミュレーションを特徴づけるキーワードのうち、類似性評価で用いるキーワードの値を第7表に示す。なお、パラメータの値は、第7図に示すように、幾つかの類似性評価のテストケースに対して、事例ベース中の事例に対する総合的な類似性評価値の大小関係をあらかじめ設定しておき、この順序関係を満たすよ

第7表 例題における事例検索のための
キーワードの値

キーワード名	例題A (Trojan SBLOCA)	例題B (Ginna SGTRA)
破断場所	ホットレグ	SG細管
破断口径 (ft ²)	0.15	0.005
SG形式	WH	WH
時間変化データの 時間帯 (s)	0~400	0~1,800
ループ数	4	2
小破断発生前のプラ ント出力 (%)	100	100

テストケースと 総合的な類似性評価値の 予め与えられた大小関係	事例ベース中の事例に対する 総合的な類似性評価値	パラメータの 満たすべき条件式
事例1を指定した時 $P_{c,4} > P_{c,2} > P_{c,6} > P_{c,10}$	$P_{c,2} = 0+1+1+1+1$ $P_{c,4} = \frac{\alpha+\beta}{2} \times 0.5+1+1+1+1$ $P_{c,6} = \frac{\alpha+\beta}{2} \times 0.5+e+1+\zeta+1$ $P_{c,10} = \frac{\alpha+\beta}{2} \times 0.75+\delta+1+\zeta+1$	$2 > \frac{\alpha+\beta}{4} + e + \zeta$ $\frac{\alpha+\beta}{4} + e > \frac{3}{8}(\alpha+\beta) + \zeta$ $P_{c,4} > P_{c,2}$ は既に成立 している
事例 (ホットレグ破断、 中程度、WH型プラ ント、4ループ、時間帯 : 0-400秒、初期出力 : 100%) を指定した 時 $P_{c,2} > P_{c,12} > P_{c,3} = P_{c,4} > P_{c,7}$	$P_{c,2} = \frac{\alpha+\beta}{2} + 1+1+1+1+1$ $P_{c,4} = 0+1+1+1+1+1$ $P_{c,3} = 0+1+1+1+1+1$ $P_{c,7} = \frac{\alpha+\beta}{2} + e+1+\zeta+1$ $P_{c,12} = \frac{\alpha+\beta}{2} \times 0.5+1+1+1+1+1$	$2 > \frac{\alpha+\beta}{2} + e + \zeta$ $2 > \frac{\alpha+\beta}{4} + e + \zeta$ $P_{c,2} > P_{c,12} > P_{c,3}$ および $P_{c,3} = P_{c,4}$ は既に成立 している
事例9を指定した時 $P_{c,14} > P_{c,1} = P_{c,13}$	$P_{c,1} = \frac{\alpha+\beta}{2} \times 0.5+1+1+\zeta+1$ $P_{c,13} = \gamma+\delta+1+1+1+1$ $P_{c,14} = 1+e+1+1+1+1$	$1+e > \frac{\alpha+\beta}{4} + \zeta$ $\frac{\alpha+\beta}{4} + \zeta = \gamma + \delta$
P_i は、ケース <i>i</i> に対する総合的な類似性評価値を表す。 パラメータ値の決定においては、 $1 > \alpha > \beta > \gamma > 0$ $1 > e > \delta > 0$ $1 > \zeta > 0$ の条件を考慮し、かつ、 α は1に近く、 γ は0に近く、 β は0.5前後の値という 条件で求めている。		

第7図 類似性評価関数のパラメータの決定

うに試行錯誤的に決定した。求められたパラメータ値は、キーワード「破断場所」に関連する α, β, γ は0.7, 0.5, 0.2, 「SG形式」に関連する δ, ε は0.6, 0.8, 「ループ数」に関連する ζ は0.4となった。なお、このパラメータの値の組は一通りではないが、このようなパラメータ値決定方針は一般的に適用できよう。また、類似性評価においてはSBLOCAの条件が重要と考え、キーワード「破断配管」と「破断口径」の類似性を重視した。すなわち、各キーワードの重み w_i は、 w_1 のみ2.0、その他はすべて1.0とした。そのため、類似性評価の満点は600点となる。以下では、これら2つの問題に対するプラント挙動の推定結果について考察する。

1. WH社型PWRプラントのホット レグ小破断事故でのプラント挙動 の概略推定

この例題は、事例ベースに登録した事例Trojan SBLOCAh1とTrojan SBLOCAh2を作成するために行なった数値シミュレーションで、破断口径だけを変えた場合である。したがって、「事例特徴データ」は「破断口径」以外はすべてこれらの事例と同じである。

まず、類似性評価の結果を示す。総合的な類似性評価値が500点以上となった事例と、その総合的な類似性評価値とを第8表に示す。これから、問題とする数値シミュレーションに最も類似する事例はTrojan SBLOCAh1であると判定された。この評価結果は、事例Trojan SBLOCAh2の評価値がやや低いと感ずるが、WH型プラントの事例でかつホットレグ破断や破断口径の近い事例が高い類似度を得ており、妥当であると考えられる。

まず、プラント挙動の概略の推定結果について

第8表 〔例題A〕における類似性評価結果

事例名	類似度の値
Trojan SBLOCAh1	560
Trojan SBLOCAc1	518
Trojan SBLOCAc2	518
ref WHcSBLOCA1	518
Trojan SBLOCAh2	500

考察する。事例 Trojan SBLOCAh1 には、ボイド率を除いて推定が必要な変数の時間変化データが揃っているため、「変数の代替」の必要はない。しかし、ボイド率の時間変化に関するデータは現在のところこの事例には収録されていないため、ボイド率の時間変化については推定を行うことはできない。そこで、残りの加圧器圧力、加圧器水位、炉心流量、破断流量について、「変数の時間変化の修正」により時間変化の推定を行なった。推定された各変数の時間変化の概要と RELAP4/MOD6 によって計算された時間変化との比較を、第 8 図に示す。これらのグラフに基づき、各変数の修正結果について考察する。なお、第 8 図には

第 8 図 WH 型 PWR プラントにおける
ホットレグ小破断冷却材喪失事故の
プラント挙動の推定結果

検索された事例 Trojan SBLOCAh1 における時間変化も重ね書きしている。

(1) 加圧器圧力

加圧器圧力については、本システムによる推定結果(以下、修正結果)は、RELAP4/MOD6 による計算結果よりも低くなっており、真値に対して最大約 25% 低くなっている。この原因については 2 つ考えられる。(1) スクラム以前の圧力の減少率を少し大きく算出してしまった、(2) 減圧による冷却材の沸騰による効果を考慮していなかったことである。減圧沸騰により、加圧器圧力の減少は止まる。減圧沸騰が生じる圧力は、スクラムによる冷却材温度の低下を推定できれば、ホットレグ温度に対する飽和圧力として推定できると考えられ、修正ルールの拡張が必要であろう。

(2) 加圧器水位

加圧器水位については、修正結果と RELAP4/MOD6 による計算結果とがほぼ一致しており、修正がうまくいっているといえる。

(3) 破断流量

修正結果は RELAP4/MOD6 による計算結果よりやや大きく、真値に対して最大約 45% 大きくなっているが、おおまかな傾向は捉えているといえよう。なお、グラフで数値が負となっているのは流出を意味している。

(4) 炉心流量

炉心流量については、修正結果のグラフが RELAP4/MOD6 による計算結果のグラフより若干上方にあるが、これはスクラムが計算結果より遅い時間で入ったと推定したためである。しかし、その違いはあまり大きくなく、修正はうまくいっているといえる。

以上の考察により、この例題については、プラント挙動の概略の推定というシステムの目的と要求精度を考えると、妥当な推定結果が得られていると考える。

2. 蒸気発生器細管破断事故での プラント挙動の概略推定

類似性評価の結果、総合的な類似性評価値 P が 500 点以上得た事例は、Prairie1 SGTRA ($P=600$) と refCESGTRA ($P=580$) の 2 つであった。これ

から、システムは事例Prairie1 SGTRAを検索事例とした。事例ベース中には、SG細管破断の事例はPrairie1 SGTRAとrefCESGTRAの2例だけであり、前者はWH社型プラント、後者はCE社型プラントの場合であり、妥当な検索結果である。

事例Prairie1 SGTRAには、ボイド率を除いて本システムに要求されるプラント変数に関する時間変化が収録されている。ただし、炉心流量については、「変数の代替」により推定する必要がある。しかしながら、GinnaプラントSG細管破断事故解析の文献に報告されている変数のうち、本システムに推定が要求されているプラント変数は、加圧器圧力、加圧器水位の2つだけであった。そこで、この2つの変数についてのみ、プラント記録値との比較を考察する。それぞれのプラント変数の時間変化の比較を第9図に示す。なお、図には検索された事例Prairie1 SGTRAにおける時間変化も重ね書きしている。

(a) 加圧器圧力

(b) 加圧器水位

第9図 GinnaプラントにおけるSG細管破断事故のプラント挙動の推定結果

加圧器圧力については、修正結果はほぼプラント記録と一致している。すなわち、600s以後については誤差は15%以下である。しかし、スクラム前後についてはややずれている(60s程度時間的に後ろにずれている。実事象では約300sでスクラムが発生しているので、これは時間的に約20%ずれている)。なお、「プラント挙動データ」は各変数の時間変化のグラフから値を読み取り作成したので、スクラム直後の急激な圧力の減少部分についてはグラフの傾きが大きく、わずかなグラフの読取り誤差でもその影響が大きい。また、加圧器水位については、やや高く推定する傾向があるが、プラント記録とよく一致している。すなわち、加圧器水位がほぼゼロとなる600s以降においても、その誤差は3%水位以下である。以上から2つ目の例題についても、事故のシナリオはかなり類似しているが、検索された事例とはかなり異なったプラント挙動にもかかわらず、本システムの要求精度を満足するよい推定結果が得られているといえる。

IV. 結 論

本研究では、数値シミュレーションモデルを立てる際に必要となる対象プラントの挙動の概略の推定が、多くの場合、専門家の過去の経験や文献での記述を参考に行われていることに着目した。そこで、この問題解決過程を計算機化するため、過去の事例での解決案や解決策を活用して新たな問題を解決する推論法として注目されている、CBRの適用を図った。具体的には、PWRプラントのSBLOCA解析を対象として、類似事例を活用するシステムの構成についての検討と構築を行なった。

CBRシステムにおいては、事例を検索する際のキーワードの選択と評価関数の決定、また検索事例の修正ルールに獲得が重要であるが、一般的な方法論は未だ確立されていない。これらに対して、本研究においては以下のようなアプローチを採った。まず、キーワードの選択では、事例を特徴づけるキーワードを分析し、①同じような意味を持つキーワードをグループ化して、それらの中の1つに代表させる、②細かい差異を表わす

キーワードについては、事例の修正において考慮する、との方針により6つのキーワードを選んだ。これらの観点のうち、②については、事例ベースに収録される事例数が多くなれば、検索のためのキーワードを追加することも考えられる。例えば、本研究の場合では、事例の修正において大きなウェイトを占めた安全系の動作条件が、追加のキーワードとして考えられる。

本研究では、SBLOCAしか対象としなかったが、PWRプラントにおいて想定される異常な過渡事象としては、2次系での異常なども考えられる。事例ベースを拡張してこれらの異常に関する事例も含めていく場合には、キーワード「破断配管」や「破断口径」を、それらの上位の概念である事故形態に変更することも必要であろう。また、評価関数については、それぞれのキーワードの値の取り得る範囲を考慮して関数形を設定し、パラメータ値についてはいくつかの類似性評価のテストケースに対して、事例ベース中の事例に対する総合的な類似性評価値の大小関係をあらかじめ与えておき、これを満たす一つの解として求めた。

一方、事例の修正では、すべての事例において必要なプラント挙動データが揃っているわけではないので、類似のプラント変数から推定する「変数の代替」と、検索された事例のプラント挙動から問題とするシミュレーションにおけるプラント挙動を推定する「変数の時間変化の修正」の2段階とした。そして、これらにおいて用いられるルールは、事例ベース中の事例におけるプラント挙動を近接的な影響に着目して分析することにより獲得した。

作成したシステムによるプラント挙動推定の精度の検討は、①WH社型4ループPWRプラントのホットレグ小破断事故と、②米国GinnaプラントのSG細管破断事故におけるプラント挙動の推定を通して行なった。全体的な評価としては、比較的簡単な修正ルールであるにもかかわらず、よい推定結果であるといえる。注目すべき点は、ある程度プラント挙動が異なっている、事故のシナリオがほぼ同じであればプラント挙動をかなり正確に推定できたことである。しかし、減圧沸騰の考慮など改善すべき問題点も抽出された。

今後の研究課題としては以下のような事項が挙げられよう。まず、事例ベースはまだ不完全であり、(1)事例ベースの整備、拡張が必要である。これについては、これまでの原子力プラントの開発を通して多数の安全性解析が行われているので、これらの解析結果の利用が考えられる。また、(2)修正ルールについても今後のプラント挙動の推定の試行を通して充実していく必要がある。

さらに、本研究では、複数事例の利用は考えなかったが、同じプラントで同じ破断場所のSBLOCAで破断口径のみが異なる事例が複数収録されている場合には、複数事例の利用が有効であると考えられるため、どのような場合にどのように複数事例を用いるかの検討も必要である。また、成功事例を事例ベースに格納したり、失敗事例により類似性評価におけるパラメータ値を修正する機構を追加し、本システムをCBRシステムへと発展させていきたい。

本研究では、数値シミュレーションモデル作成のためのプラント挙動の概略を推定することが目的であった。しかしながら、CBRによるプラント挙動の概略推定は、詳細な数値シミュレーションを行わずに推定可能という点で、原子力プラントの異常診断システムや緊急時対応システムに必要な予測機能の構成法としても有効と考えている。

本研究を進めるにあたり、立命館大学理工学部情報工学科の山崎勝弘博士に有益な討論を頂いた。ここに、謝意を表したい。

— 参 考 文 献 —

- (1) 神原武志, 他: “コンピュータ物理の世界”, ブルーバックス, (1991), 講談社.
- (2) 五福明夫, 他: 蒸気-水二相流過渡解析を行う数学モデルの選択支援エキスパートシステムの開発, 原子力誌, 34(11), 1073~1085 (1992).
- (3) 五福明夫, 他: エキスパートシステムにおける利用者の意図抽出への階層化意思決定法の適用, システム制御情報論文誌, 5, 94~101 (1992).
- (4) IWASAKI, Y.: “Qualitative Physics, The Handbook of Artificial Intelligence”, Vol. IV, 323~413 (1989), Addison Wesley.
- (5) Cognitive System 社: Case based reasoning, IJCAI-89 Tutorial MA2, (1988).

- (6) 小林重信: 事例ベース推論の研究課題, 情報処理研報, 91-AI-75, p. 29~38 (1991).
- (7) KOTON, P.: Reasoning about evidence in causal explanation, *Proc. AAAI-88*, pp. 256~261 (1988).
- (8) NAVINCHANDRA, D.: Case based reasoning in CYCLOPS, a design problem solver, *Proc. Case-Based Reasoning*, p. 286~301 (1988).
- (9) 中村孝太郎, 他: 事例ベース推論の対話型モデルとその機械調整支援への適用, 人工知能誌, 4, 82~91 (1989).
- (10) 仲谷善雄, 他: 事例ベースアプローチによる設計支援, 情報処理研報, 91-AI-75, p. 39~48 (1991).
- (11) 奥田健三, 他: 電力系統事故時復旧支援における事例ベースの構築法と洗練化, 同上, 91-AI-75, p. 49~58 (1991).
- (12) アップルコンピュータジャパン: HyperCard リファレンス, (1990).
- (13) ABRAMSON, P.B.: "PWR Small Break LOCA, Guidebook to Light Water Reactor Safety Analysis", p. 94~198 (1985), Hemisphere Pub.
- (14) TANABE, F., *et al.*: Post-facta analysis of the TMI accident (I): Analysis of thermal hydraulic behavior by use of RELAP/MOD6/U4/J2, *Nucl. Eng. Des.*, 69, 3~35 (1982).
- (15) 田辺文也, 他: TMI事故の熱水力学的解析(第1次~第3次解析の結果, *JAERI-M* 8653, (1980).
- (16) EG&G: RELAP4/MOD6: A computer code program for transient thermal-hydraulic analysis of nuclear reactors and related systems User's Manual, *CDAP-TR-003*, (1978).
- (17) RANSOM, V. H., *et al.*: RELAP 5/MOD1 code manual volume 1 system and numerics, *NUREG/CR-1826*, (1981).
- (18) GOFUKU, A., *et al.*: A simulation of steam generator tube rupture accident by safety analysis code RELAP5/MOD1, *Tech. Rep. Inst. At. Energy Kyoto Univ.*, No. 211 (1989).
- (19) Aerojet Nuclear Co.: RELAP4/MOD5; A computer program for transient thermal-hydraulic analysis of nuclear reactors and related systems, User's Manual Vol. III, checkout applications, *ANCR-NUREG-1335*, p. 55~90 (1976).
- (20) U.S. NRC: Steam generator tube rupture at R.E. Ginna Nuclear Power Plant, *NUREG-0909*, (1982).

◇「若い風」欄の新設◇

本年から「若い風」欄が新設され, 1月号から毎月掲載されています。若手会員のご寄稿を期待します。(投稿歓迎)

記

- 1) 刷上り: 1,700字程度(B5判・8ボ2段, 1ページ)
- 2) 寄稿期限: 掲載号の前月10日
- 3) 30代半ばまでの学生を含む若手会員(外国人も対象とするが和訳のこと)。いろいろな分野や立場の人をお願いしたい。
- 4) テーマは全く自由: 自己紹介や研究分野, 他分野の研究状況やその研究の進め方について, 所属機関やその組織についての意見, 本会の運営や学会の在り方に対する苦言や提案などなど。

外国人ならば, 研究やその他自国の状況, 外国人の目から見た日本の状況, 研究体制や研究の進め方について, 日本の学生や研究者についての意見, など。

本会「英文誌」投稿者はお問合せ下さい。

☆JICSTの翻訳サービス☆

日本科学技術情報センター(JICST)では, 科学技術全分野を対象とする学術論文等の専門家による翻訳サービスを行なっています。

JICST東京支所(03-3230-1341)

☆英文校正サービス☆

ネイティブによる英論文のリライトサービスをご希望の向は, 下記へ。

㈱ユニバーサル・アカデミー・プレス
(東大赤門前)03-3813-7232