

地下資源探査におけるエキスパートシステム

Expert System for Underground Resources Exploration

石堂 昭 夫*

Akio Ishido

1. はじめに

地下資源といえば原油、金属鉱物、地熱などを考えるが、現在では地下の均質岩盤や地下空間なども資源として各方面から注目されるようになってきた。またそれら有形無形の資源の探査に関する諸活動も、物理探査・地質調査・試錐など直接の調査活動から、それを支える各種支援活動、それに先行する情報活動・鉱業権益の取得交渉、また探査に続く評価作業などきわめて広範囲に亘っている。したがって、地下資源探査にエキスパート・システムを役立てようとするならば、さまざまな分野での利用を考えることができる。適用したい領域をごく限定し、適切なツールを選定すればよい結果を得ることができるであろう (表1参照)。

企業活動としての地下資源探査は、大きな不確定性、多大な投下資金をその特徴とし、鉱業権益など対政府関係の交渉ごとが多い事もあって、そのプロジェクト

表1 資源探査分野におけるエキスパート・システム開発事例 (Shultz et al.¹⁾の表に著者が追加)

システム名	対象領域
PROSPECTOR ²⁾³⁾	鉱床探査
DIPMETER ADVISOR ⁴⁾	ディップメータとログデータの解釈
LITHO ⁵⁾	ログデータの解釈
無名 ⁶⁾	地震調査
無名 ⁷⁾	沿岸の岩相解釈
EXPLOR ⁸⁾	石油探査有望地域の評価
muPETROL ⁹⁾	海盆の分類
無名 ¹⁰⁾	地震探査フィールドパラメータの決定
XEOD ¹¹⁾	砕せつ堆積環境の解釈
無名 ¹¹⁾	炭酸塩貯留層の評価
FINDER ¹²⁾	鉱床探査
無名 ¹³⁾	ウラン鉱床探査

* 動力炉・核燃料事業団中部事業所技術開発課主査
〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31

の遂行・成果に関して、企業内部のみならず政府レベルの関心にも適切に答えて行く必要がある。

本論は、上に述べたような限定的な領域でなくこうした地下資源探査に係わるいわば総合的な意思決定の分野にエキスパート・システムが利用できるかどうかという立場から、著名なシステムのレビューと現在私共が進めているシステムの紹介を行うことによってそのあり方を考えてみたものである。

2. 地下資源探査と作業モデル

エキスパート・システムは従来のシステム技術と異なる幾つかの特徴を持っている。地下資源探査に係わる諸作業の内どのようなものにその特徴的技術が利用できるのかについて簡単に整理しておく。図-1は、地下資源探査の遂行に係わる作業を筆者の考える理想的な作業モデルとしてフローチャートにしたものである。この図から地下資源探査作業の特徴を次のように整理してみた。

- (1) 観測データを解析・解釈して調査地の形成モデル又は有望度マップを推定する作業モード (解を求めるモード) と、一連の調査結果から基準とした形成モデルを更新する作業モード (知識更新のモード) とがある。
- (2) 解を求めるアルゴリズムが明確な作業フェーズと、不明確な作業フェーズがある。
- (3) 用いられる処理は数値処理、記号処理、図化処理、パターン認識の組み合わせである。
- (4) 知識は不確実 (あいまい) 性と不完全性を持つ。

上記の作業の特徴ごとにエキスパートシステムの適用可能性を考えてみる。現状のエキスパートシステム技術で対応しうる推論機構が演繹的推論に限定されている。従って(1)の解を得るモードでは、演繹的推論が基本となる問題であれば利用の可能性が出てくる。エキスパートシステムは一般に推論機構と知識ベースが分離されており、またユーザ向きの知識表現形式を提

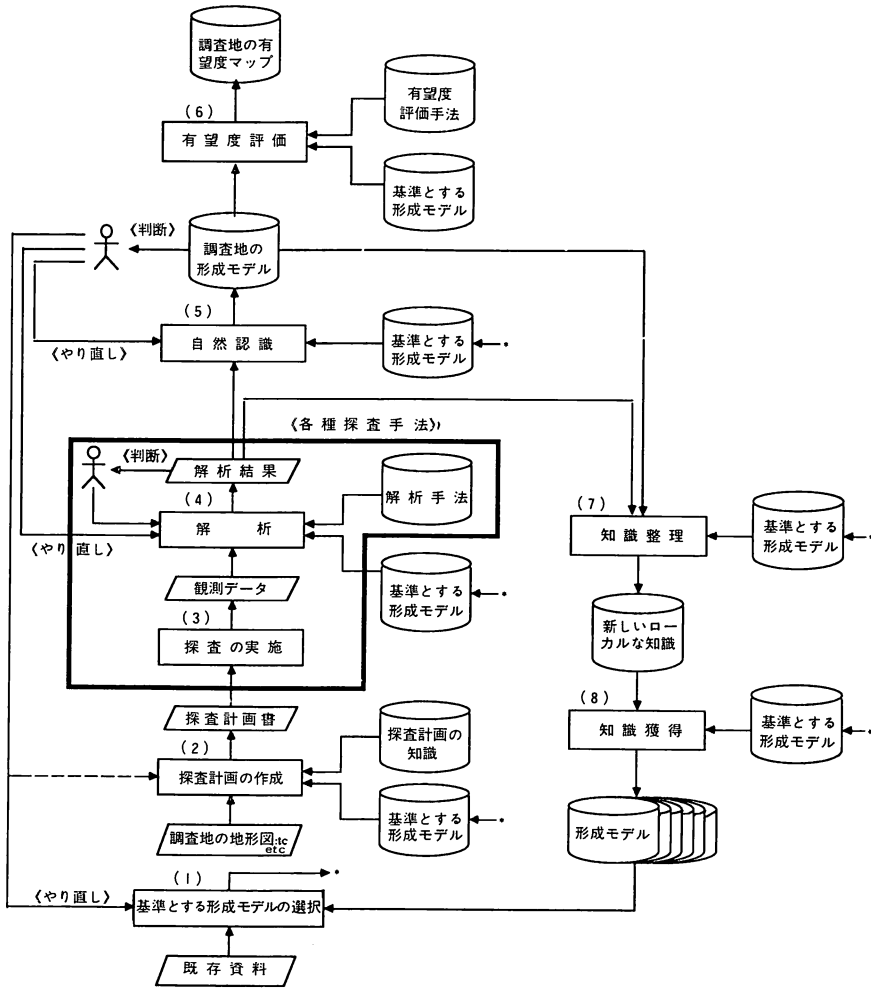


図-1 地下資源探査における作業モデル

(1)~(6) : 解を得るモード (7)&(8) : 知識更新のモード

供しようという特徴を持つ。従って(1)の知識更新のモードへの利用価値は高いと言われている。

(2)は(1)の知識更新モードで述べた状況と良く似ている。即ちエキスパートシステムは解を求めるアルゴリズムが不明確な問題について、想定されるアルゴリズムをいろいろな観点でテストしながら最適なものにして行く環境、いわばプロトタイピングを提供しよう。

エキスパートシステムは記号処理に優れたシステム技術である。従って(3)の、記号処理中心の作業フェーズに適している。当然ながら記号化できない知識が重要な問題には利用できない。

(4)の知識の不確実性については、知識表現形式によって制限を受けるが、多くの場合確信度係数などを用いることによって対応可能である。しかし知識の完全性

については対応できない。これは、演繹的推論によって解を求めるのに必要な知識群は完全でなければならないからである。このため、知識ベースに入力する知識の整理・体系化が、予想以上に困難となることが多い。

3. 地下資源探査における代表的エキスパート・システム

地下資源探査における代表的エキスパート・システムは、DIPMETER ADVISORとPROSPECTORであろう。

ここでは、これらエキスパート・システムがその対象とした作業フェーズを上記の整理に基づいて説明し、システムとしての特徴をまとめてみる。

3.1 DIPMETER ADVISOR⁴⁾

DIPMETER ADVISORは、シュルンベルジェが1981年に開発しその後実用化した油田検層のためのエキスパート・システムである。対象とする作業は解析のフェーズであり、デバッグメータと検層データの地質学的解釈を目的としている。解析作業を細かく見ると、以下に示す6つの部分作業に分割される。システムはこれら部分作業に対応してサブシステム化されている。それぞれの部分作業で中心となっている処理を並記しておく。

《部分作業》	《中心となる処理》
(1) データの正当性のチェック	数値処理&図化処理
(2) 岩相解析	数値処理&パターン認識&図化処理
(3) 構造傾斜解析 (大局的地質構造の検出)	パターン認識&図化処理
(4) 地層構造の解釈 (断層等の検出)	パターン認識&記号処理&図化処理
(5) 堆積環境の推定	記号処理
(6) 層序的解釈	パターン認識&記号処理&図化処理

パターン認識と記号処理に用いる知識はそれぞれ、深度など1次元データに関する数学的なものと、地質学に関するルールで記述されている。地質学に関するルールは解析レベルのものが中心で、形成モデルに関する知識は部分的に用いているようである。ルールの数は約90とさほど多くない。コーディング量を見ると、記号処理の部分は全体の30%ぐらいで、逆に図化表示を含むユーザインタフェイスの部分が60%を占めている。従ってこのシステムの特徴は、記号処理機能単独の優秀性よりはむしろ、各作業内容に応じて、高度な図化処理機能及びユーザインタフェイス機能と記号処理機能を有機的に組み合わせたところにあると思われる。

DIPMETER ADVISORが早期に実用化に至った理由としては以下の理由が挙げられる。

- (1) 組織内に優秀な専門家がいてしかも必要な知識がかなりのレベルまで文書化されていた。即ち知識の体系化が既にされていた。
- (2) パターン認識と地質学的解釈を中心とする高度かつ複雑なルーチンワークを、短時間で確実に実行わねばならないという需要があり、その作業内容

にエキスパート・システム技術を適用すると判断したことが適切だった。

- (3) 上述のそれぞれの部分作業に対応するサブシステム毎に図化表示機能を含んだユーザインタフェイスを充実させることによって、専門家の判断が随時介入しやすい環境を提供し、システムが専門家の便利な道具として機能した。

3.2 PROSPECTOR²⁾³⁾

PROSPECTORは、U.S.G.SがS.R.I.Internationalに委託し1976年に開発着手した、鉱床モデルのタイプ毎に調査地の有望度を求めることを目的とするエキスパート・システムである。用いられている知識は、種々の鉱床タイプに関する地質学的及び鉱床学的知識である。全体の作業は、下に示す4つの作業フェーズから構成される。

《作業》	《中心となる処理》
① 重要な岩石と鉱物のタイプから追及を深めるべき鉱床モデルの選択を行う作業フェーズ	記号処理
② 選択した鉱床モデルに基づき詳細な解析を行い、調査地がその鉱床モデルであることの確信度を求める作業フェーズ	記号処理&数値処理&図化処理
③ 適切な削岩地点を示すマップを作成する作業フェーズ	記号処理&数値処理&図化処理
④ 新たな鉱床モデルタイプに関する知識を獲得する作業フェーズ	記号処理

①と②で用いている鉱床タイプは1983年時点で32種類ある。それぞれ、知識表現は推論ネットワークで記述されている。推論ネットワークは、意思決定に関する知識及びその知識をどう用いるかに関する戦略的知識を、両方同時に扱える特徴を持つ。ネットワークを構成するノードが事実又は仮説に対応しさらにその確実度が記述される。ノード(事実・仮説)間の関係がルールとして記述され確信度を伝播させる。ここではネットワークのトップノードが「その調査地の鉱床は、選択した鉱床タイプである」という事実になり、下位ノードからの確信度の伝播によってその確信度が決まる。なお各鉱床タイプのルール数は20~169個である。

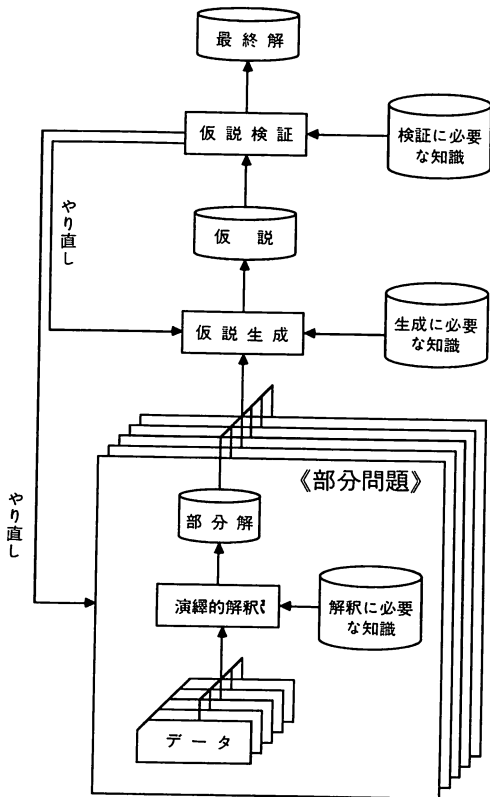


図-2 自然認識における作業モデルの1例

問題の性格としては、①は、対立する少数の鉱床タイプからいずれかを選択するという、意思決定あるいは判断を目的とする問題に帰着する。従って図-1で言えば作業フェーズ(1) (基準とする形成モデルの選択)に相当する。一方②は、選択した鉱床タイプをもとにしてより正確な確信度を計算するため、多くの質問を専門家に課すといえるものである。

従って図-1で言えば(4) (解析) ないし(5) (自然認識)に相当する。用いる知識は、当然ながら形成モデルに関する知識中心である。作業フェーズ③は、調査地域を多くのメッシュに分割し、各々のメッシュについて立錐地点としてどの程度の好条件 (有望度) を有しているかを決定する。この手続きをすべてのメッシュについて繰り返すことで、適切な立錐地点を決定するための有望度マップを作成している。ここで用いる知識は、存在が期待される鉱床タイプ (基準とする形成モデル) に関する知識と、メッシュ毎に有望度を計算するアルゴリズム (有望度決定手法) の2つである。また、用いる鉱床タイプに関する知識は3種類あり、①と②で用いた鉱床タイプに関する知識とは異なったも

のである。本作業フェーズは、図-1の(6) (有望度評価) に対応する。作業フェーズ④は、図-1の(8) (知識獲得) に対応している。U.S.G.S.は9個の鉱床タイプを体系化し知識ベース化した時点で、それらに共通した知識構造パターンを発見し、それに基づき残りの鉱床タイプを作成している。

このようにPROSPECTORは極めて広範囲の作業を対象としたエキスパート・システムで、その意味で非常に参考になったが、U.S.G.S.では1984年にこの計画を打ち切っており、作成した鉱床モデルはその後余り利用されていない (と聞いている)。システムとしては、表現形式の問題、不確実な知識の取扱の問題、知識獲得の問題、モデルの検証の問題等解決すべき課題が残されていたであろうが、その前に、ユーザーである地質専門家が、開発の過程で「事実の積み重ねに基づく規則性の認識が不十分である」点に直面したために研究の方向が変わったのではないと思われる。扱った地質学的知識の多くが、事実データ (あるいは仮説) どうしの論理的結合関係を示すルールで表現されているが、その事実データに付与される確信度自体も主観的なものであり、こうしたいわば本質的な曖昧さを地質専門家が疑問視するようになったからである。事実あるいは仮説を表わす地質学的用語は、複雑で多岐に渡る諸属性を総合し一言で表現できる長所がある一方、鉱床の生成モデルのシステムティックな記述になじまない。

そこでU.S.G.S.では現在、あいまい性の無い定量的な事実認識を中心にした鉱床モデルの体系化を進めている。またわが国の地質調査所との共同開発で、PROSPECTORの主観的確信度を定量的な確率分布によって求める、資源評価を目的とするFINDER¹²⁾ というエキスパート・システムを開発している。FINDERで扱うデータはサンプルの座標位置と定量的属性値であり、また知識は、各属性が鉱化域と非鉱化域で取り得る値の平均値と分散及び理想的パターン情報等である。両者を比較することによってその属性に関する鉱化域である確信度と非鉱化域である確信度を求め、Bayes則に基づきすべての属性の上記2つの確信度から鉱床としての有望度を計算する。図-1で言えば(6)の作業フェーズ (有望度評価) に相当すると考えられる。

4. 動力炉・核燃料開発事業団のIRESS (仮称) 開発

4.1 有望度評価を目的とするエキスパート・システム¹⁹⁾の開発

動力炉・核燃料開発事業団（以下事業団）におけるエキスパート・システム開発は、1984年に「初期的ウラン資源探査プロジェクト評価手法の研究」の一環として始められ、初期的なウラン資源探査プロジェクトの地質鉱床学的評価を目的とするエキスパート・システムのプロトタイプ開発を2年間にわたって行った。政治的側面とか経済的側面といった種々の評価項目と同じく技術的側面における評価点数を1つ求める必要があり、その計算にエキスパート・システムの利用を検討したのである。

従って対象となる作業フェーズは有望度評価であった。1つの評価点数を求める有望度評価手法の調査が中心であり、知識ベースの作成に当たっては、その時点で有望度評価に利用できるものに限定して知識を抽出した。最終的には作成した知識ベースはメジャーなウラン鉱床タイプ4タイプ（ルール数はそれぞれ30程度）である。

このシステムが提供する作業形態は、4タイプの内のユーザが指定した特定のウラン鉱床モデルに基づきシステムが質問を發し、それに対しユーザが順次答えていくことによって、その調査地域とそこで想定している鉱床モデルとの類似性の程度をシステムが計算するというものである。処理内容はほとんど記号処理であり、また知識表現手法はU.S.G.S.のPROSECTORを参考にした推論ネットワークを採用した。

このエキスパート・システムのシェル部分は、後に「コギト」として発売された。現在このプロトタイプは、技術的側面の有望度評価を検討するサブシステムとして初期的なウラン資源探査プロジェクトの評価に寄与している。開発を終えて指摘された主な点は、大別して2点あって、第1はウラン鉱床モデルの内容に対する問題、すなわちウラン鉱床モデルに関する知識が単純で、技術者としてはさほど利用のメリットが感じられないという点、第2はシステムが提供した作業形態に対する問題、すなわち評価に至る作業形態が1つの知識ベースに基づく単純な演繹的解釈という、きわめて単純なものになってしまうということであった。

4.2 自然認識を目的とする「IRESS」の開発

ウランは酸化すれば容易に水に溶け、また水に溶けているウランも還元環境で容易に沈澱する。この様に化学的に変化に富む挙動を持っているため、ウラン鉱床の生成プロセスもまた変化に富む。ウラン地質技術

者は、こうした数多くある鉱床生成モデルのどれかを作業仮説として探査活動を指揮し、調査の進展とともにこの作業仮説を適宜修正し作業の展開やそのプロジェクトの評価に反映させて行かねばならない。こうした地質専門家が持つ鉱床生成モデルの確定を指向した作業を自然認識と呼ぶ。すなわち鉱床を含みかつその鉱床の生成に関連する大きな範囲の地質の状況とその地球規模の時間スケールでの変化を頭の中で繰り返し吟味しながら鉱床生成プロセスのイメージを具体化させようとする等いわば規則性を前提にした現象・自然などに対するより確かな認識への指向をとりあえずこう呼んでおく。

このプロトタイプの第1の問題は、技術者の多くがプロトタイプに対し、その目的が有望度評価であったにも拘わらず、自然認識のための道具として考えてしまうというところであった。目的が違えば知識の内容は大きく変わる。技術者は有望度評価といういわば最終的な目的へ向う以前に、自然認識への手だてをより必要としていた。

第2の問題はプロジェクトの評価のプロセスに関係している。有望度の評価は適切な自然認識の中でごく自然になされるものである。ところが基準とすべきウラン鉱床モデルが不明確であるため、演繹的解釈・仮説生成・仮説検定といった色々な特徴的作業を意識的／無意識的に組み合わせ、何度も試行錯誤した上でようやく最終的な解が決まるすなわち評価がなされる、というのが実態である。単純な演繹的解釈ですませられるものではない。図-2はそのような作業モデルの1例である。

事業団ではこうしたプロトタイプの検討を踏まえ、開発の方向を技術者の適切な自然認識を幅広く支援できるようなエキスパート・システムにおくこととした。そして自然認識の前提となるウラン鉱床成因論の体系化を進めると同時に、「ウラン資源探査を対象とする知的支援環境（以下IRESS）」の開発に着手した¹⁴⁾¹⁵⁾

4.3 ウラン鉱床成因論に関する知識の体系化

適切な自然認識を支えるものは豊富でかつ正確な知識である。そのため知識の抽出と整理を行わねばならない。生成モデルを構成している地質学的諸概念つまり地質学用語は、先にも述べたとおり定義が曖昧なものが多くそのままでは記号化に向いていない。このため我々は、地質学的概念を可能な限り良く定義されている概念記述できないかと考えた。必要な知識を抽出し、これを定義された概念で再構成つまり構造化して

ゆく、これを我々は知識の体系化と呼んでいる。対象は自然認識に必要な形成モデルに関する知識即ちウラン鉱床成因論に限定した。

知識の体系化は、ウラン鉱床の形成を支配する最も直接的な現象の記述をまず行い、次に、地質現象・地質環境等よりそれらの直接的現象を証拠付けるプロセスを徐々に組み立てていくと言う方針である。現在そのような直接現象として「ウラン濃集現象及びウランの濃集物質の化学」を考えており、それに関する知識、即ち現象に関する事実関係を文献など既存の資料から抽出しようとしている。

このような体系化は知識工学的手法を用いて実施され、対象領域の概念の記述と問題解決過程とを構成論的に捉える。対象領域の概念の記述は自然現象における事実関係の集合であり、構成論的手法に基づく自然現象のモデルと言うことができる。一方、問題解決過程に関する知識はそういった対象領域の特性をどのように操作し自然認識を行なうかという解釈過程を記述したものであり、人間の問題解決過程に強く拘束された形でまとめられる。

問題解決過程といってもその中には、個々の部分問題の解決からマクロな状況認識に至るまでスケールの異なる戦略が複雑に交錯していると考えられ、それらを平板に捉えるのではなく目的によって構造化しなければならない。また、ウラン鉱床成因論における問題解決過程を系統的にまとめ上げるという作業は少なくとも意識的には行なわれてこなかったと思われるので、学問的にコンセンサスの得られているものは少ない。むしろ、IRESSの開発を通して問題解決過程の系統的なまとめ上げを行なおうとしているということができる。従って、問題解決過程をアルゴリズムとして固定した或いはプログラムの中に埋め込んだ形でのシステム化は適切でなく、アイデアの探索 (exploration) を支援できるような知識システムの構築が必要なのである。その際の知識工学的アプローチの寄与として重要なことは、以下の2点ではないかと思われる。

- [1] 局所的な定義を与えられた個々の概念の構造体 (階層構造, ネットワーク構造など) として対象領域概念の特性を記述することにより, 部分的に不完全なアルゴリズムを含む知識を取り扱うことが可能であり, 更に概念の追加・修正・削除などの更新操作に伴う知識の管理が容易になる。
- [2] 問題解決過程を取り換え可能な知識の一部として明示的に取り扱うことにより, 目的指向的なプ

ロセスの記述が可能になる。また、このようなアプローチにおいては、概念の定義 (属性と関係の記述) を明確に行なわなければならないため、次のような副次的な効果が期待できる。即ち、

- [1] 問題の構造における明確な部分と不明確な部分との境界が浮き彫りにされる。
- [2] 論理的思考に基づく領域の知識構造に対する認識が促進され, 新たな議論の場を提供する。

4.4 IRESSが支援する作業

事業団が実現しようとしているIRESSの目的は、研究者や技術者などの領域専門家の自然認識における基礎的な思考活動を支援し、更に発想を助ける環境を提供する点にある。従って、領域専門家の自然認識における基礎的な思考活動においてどういった作業が行なわれるか (或いはどういった作業を支援すると領域専門家の生産性が上がるか) ということを知っておかなければならない。ここではそれについて述べるが、システムにインプリメントされる知識そのものは領域固有であるにしても、想定している作業自体は問題領域を必ずしもウラン資源探査に限定したものでなく、研究支援という観点からより広く捉えることができる。

IRESSの支援すべき作業はランタイム・フェーズに属するものとメンテナンス・フェーズに属するものに大別した。ユーザである領域研究者は、ランタイム・フェーズではシステム内にインプリメントされた知識に基づいて試行を繰り返すであろうし、メンテナンス・フェーズではシステム内の知識の更新を行なうことになるであろう。自然認識はランタイム・フェーズでの試行の一つである。以下にそれぞれについて説明する。

ランタイム・フェーズで行なわれる試行では、PROSPECTORや我々のプロトタイプが対象としているような特定の鉱床モデルに基づく演繹的解釈・評価といった“解を求める”という作業も存在するが、実際の領域専門家が行なう作業はそれのみでなく、その他のいくつかの特徴的な作業を含んでおり、それらを自分なりに組み合わせて行なっていると考えられる。それらの作業を項目として整理すると以下の3つになる。即ち、

- ① 知識に基づきデータを演繹的に解釈し解を得る (演繹的解釈)。
- ② いろいろなデータを説明するのに都合の良い仮説を作成する (仮説生成)。
- ③ 作成した仮説を検証し, その結果を吟味する

(仮説検証)。(論理的矛盾が生じた場合にはどこに問題があるか見当をつけ、仮説の作り直しを行う。論理的矛盾が無い場合、或いは多少矛盾があっても大局的に見て問題ないと判断した場合にはその仮説を採用する。)

PROSPECTORや我々のプロトタイプが支援したのはこれら作業項目の内の①ということになる。上記3項目の作業は、ユーザである領域専門家がその目的に応じて繰り返し行われるが、生成検査法 (generate and test) 的な処理が多くなると考えられる。また、①の演繹的解釈によって解が一意に求まる部分問題については判断を遅延させる必要はなく、早い段階でいくつかの解析結果から解釈結果を出しておくことは言うまでもない。メンテナンス・フェーズで行なわれる知識の更新は、ランタイム・フェーズの試行やその他の事例によって得られた新たな知見を知識として整理し一般化を図る知識整理・獲得の作業である。IRESS開発に際する基本的な思想として、領域専門家の自然認識においては“問題の解”を単に提出すればよいというだけでなく、基準とすべき形成モデルを修正し一般化していく作業が行なわれると考えている。知識の更新作業はランタイム・フェーズの作業を終えてから改めて実施する(したほうがよい)場合もあれば両者を随時織り混ぜて行なう場合もあるので、フェーズの明確な線引きはできないが、いずれにしても基準とすべき形成モデルが不明確である限りは形成モデルに関する知識は、これに基づいた解釈と同程度にその一般化(バージョンアップ)への努力がなされると考えられる。このフェーズで支援されるべき作業は、具体的には以下の2つの項目を想定している。即ち、

- ④ 試行の過程で新たに得られた知見を知識として整理し記録する。知識は形成モデルを構成する概念に関するものと、形成モデルを構築するための戦略に関するものがある。(知識整理)
- ⑤ ローカル性の強い現場的センスの知識の中から一般性を引き出す。(知識獲得)

以上、①～⑤の5項目がIRESSの支援する対象となる作業でありすなわちIRESSが必要とする機能である。現在その一部の機能についての開発が始められている。

5. おわりに

資源産業の低迷傾向の続くなか、地質や鉱山関係の専門技術者の確保が困難になってきている。ウラン資

源分野といえども例外ではない。鉱床の潜頭化が進み、探査技術の高度化が切実に要求されている。ここで述べたエキスパートシステムがこうした事態に対処する手段となりうるかどうかはなお議論の別れるところである。だが他に良い代替手段があるわけでもないことを考慮すれば、その限界を意識しながら着実な開発を続けるべきであろう。専門家の経験や勘までも代行させることはできぬだろうが、整理の次第によっては相当量の知識をシスのなかに移せるものと期待している。

参 考 文 献

- 1) Shultz, A.W., Fang, J.H., Burston, M.R., Chen, H.C., Reynolds, S.; GEOBYTE, May (1988), 22~32
- 2) Hart, P.E., Duda, R.O., Einaudi, M.T.; Mathematical Geology, Vol.10 (1978), 598~610
- 3) Duda, R.O., Reboh, R.; 人工知能の実際, W.ライトマン編 (1986), 近代科学社, 1986:118~155
- 4) Gershman, A.; Proceedings, European Conference on Artificial Intelligence (1982), 139~142
- 5) Bonnet, A., Dahan, C.; Proceedings, 8th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence (1983).
- 6) Denham, L.R.; AAPG Bulletin, Vol.69 (1985), 249
- 7) Krystinik, K., Clifton, H.E.; AAPG Bulletin, Vol.69 (1985), 276
- 8) Maslyn, R.M.; Microcomputer Applications in geology, Computers & Geology Series, Hanley, J.T., Merriam, D. F., eds. (1986), 89~103
- 9) Miller, B.M.; GEOBYTE, Spring (1986), 44~50
- 10) Penas, C., Hadsell, F., Stout, J.; GEOBYTE, Winter (1986), 42~44
- 11) Stout, J.L.; AAPG Bulletin, Vol.70 (1986), 1057~1058
- 12) 古宇田亮一; NTSエンジニアリングセミナー: 資源探査へのエキスパートシステムの適用 (1986)
- 13) 則竹和光; 同上
- 14) 石堂昭夫, 茂田直孝, 大石善雄他; 物理探査学会第78回(昭和63年度春季) 学術講演会講演論文集
- 15) 石堂昭夫, 茂田直孝, 庄司速人他; 同上
- 16) 情報数理研究所; 初期のウラン資源探査プロジェクト評価エキスパートシステムの開発(その1, 概念化) -PNC SJ7359 87-002-, 動力炉・核燃料開発事業団
- 17) 情報数理研究所; 同上(その2, システム概念設計) -PNC SJ7359 88-002-, 動力炉・核燃料開発事業団
- 18) 國藤進; メタプログラミングによる知識獲得支援のための基礎技術確立を目指して, ICOT Technical Memorandum: TM-0163 (1986), ICOT
- 19) 小林重信; 計測と制御, Vol.23, No.7 (1984), 48~52