

## ナチュラルアナログ研究の再考<sup>†</sup> —東濃ウラン鉱床における研究を例にして—

吉田英一<sup>†\*</sup>

地層処分システムでの地質環境の有する長期的な核種隔離性能に関するナチュラルアナログ研究は、自然界の地球化学的な現象の研究である。しかしながら、地球化学的な研究を行えば、それがアナログ（類似）研究になるわけではない。自然現象についての研究をナチュラルアナログ研究として位置づけるためには、研究対象とする現象と、処分システムの問題や安全性の評価に用いるモデルとの類似性を①概念モデルの構築、②安全評価モデルへのインプットデータの提供、そして③安全評価モデルの妥当性の確認の3つの観点に沿って明確にする必要があると考えられる。

本論文では、東濃ウラン鉱床で実施している地質環境中での天然ウラン系列核種の地球化学的挙動に関する研究を例に、アナログ（類似）研究として求められる必要条件について考察するとともに、わが国の処分システムの評価手法の信頼性を高めるために、今後必要と考えられるナチュラルアナログ研究の内容とその進め方について述べる。

Natural analogue regarding long-term performance of the geological disposal system for radioactive waste isolation is essentially the study of geochemical process which has been evolved in geological environment. All geochemical studies, however, will not be nominated as natural analogue studies. It is, therefore, important to be clear the criteria for natural analogue study with the view of analogy by following three categories, (1) Conceptual model development, (2) Data provision and (3) Model testing, for the concept of geological disposal and safety assessment model.

Rethinking of the criteria for natural analogue study through the case of Tono Natural Analogue Study, and the usefulness of natural analogue study for the safety assessment of geological disposal system in Japan have been presented in this paper.

### 1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分に関するナチュラルアナログ研究の基本的な意義は、地層処分システムにおける核種の地球化学的挙動や遅延現象に類似する地質学的現象を研究することによって、地層処分システムに地質時間スケールで将来発生すると考えられる地球化学的なプロセスを具体化することと、地層処分システムの安全評価に用いる室内実験データの、外挿による長期的な信頼性を高めることにある [1, 2]。したがって、地層処分システムの核種隔離性能に関するナチュラルアナログ研究を行うに当たっては、アナロジー（類似性）としての反映先で

ある処分システムの問題や、処分システムで将来発生する可能性のある地球化学的なプロセスあるいはそれらのモデルなどとの結びつきを明確にすることが重要である。

これまで国内外を問わず進められてきたナチュラルアナログ研究において、とくに 1990 年代に入ってから、その研究の進め方を見直そうとする動きがある [3]。これは、オクロ天然原子炉の発見から始まったナチュラルアナログ研究の概念を、地層処分システムの安全評価手法の信頼性を高めるためのより具体的な方法として用いようとする動きに他ならない。このような考え方は、今後、地層処分システムの安全評価に関する研究の詳細化に伴い、さらに活発化するものと思われる。

本論文では、東濃ウラン鉱床で実施している地質環境中での天然ウラン系列核種の地球化学的挙動に関する研究を例に、これからの地層処

<sup>†</sup>Rethinking of the Criteria for Natural Analogue Study —A case of Tono Natural Analogue Study—, by Hidekazu Yoshida

<sup>†\*</sup>動燃事業団東濃地科学センター Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. (PNC), Tono Geoscience Center

分システムにおける地質環境の有する核種隔離性能に関するナチュラルアナログ研究として求められる必要条件について再考するとともに、わが国の将来構築されるであろう処分システムの安全評価に直接反映させることのできる、ナチュラルアナログ研究の内容とその進め方について述べる。

## 2. ナチュラルアナログ研究における「アナログ(類似)性」の意味

地層処分システムにおける地質環境の有する長期的な核種遅延・隔離性能に関するナチュラルアナログ研究は、自然界の地球化学的な現象の研究である。しかしながら、地球化学的な現象を研究すれば、それがアナログ(類似)研究になるわけではない。自然現象についての研究をナチュラルアナログ研究として位置づけるためには、研究対象とする現象と、処分システム概念や安全性の評価に用いるモデルとの類似性を可能な限り明確にする必要がある。

これまでのナチュラルアナログ研究には、Nagra(スイス)のI. Mckinleyらが行っている、地層処分システムの安全評価に用いるモデルの確証を最終目的とした進め方(たとえば[4])と、CEA(フランス)のJ.C. Petitらの強調する、多重バリアシステムの長期的な耐久性や核種の隔離性能あるいは遅延性能に関する現象把握に重点を置いた進め方(たとえば[5])があげられる。前者は、サイトスペシフィックな処分システムの安全評価研究との結びつきが強く、処分コンセプトや岩種が決まっていない場合の研究方法としては必ずしも適用性のあるものとは言えない。一方、後者は基礎研究としての位置づけの強いものであり、処分システムの安全評価研究との結びつきの明確さに欠ける点が認められる。これらの研究目的の相違は、各国の処分研究の進め方に対応して展開されているものである。したがって、今後われわれがナチュラルアナログ研究を、地層処分システムの安全評価に具体的かつ直接的に反映させえる手法として用いるためには、これまでの研究方法例も考慮しつつ、わが国の処分システムの安

全評価手法との結びつきに関する考え方を明確に示すことが必要と思われる。

これまで動燃では、地質環境の放射性核種の遅延特性に関するナチュラルアナログ研究として、東濃ウラン鉱床での地質環境中における天然ウラン系列核種に注目した研究を行ってきた。この研究は、ウラン鉱床の形成プロセスを理解することにより、地質環境中における放射性核種の移行・遅延特性を具体的に把握することを目的としたものである。東濃ウラン鉱床に関しては、動燃はこれまで過去約20年間にわたってウラン鉱床地域の地質・鉱物、そして最近では水理・地下水の地球化学およびウラン鉱体部の詳細な地質学的、鉱物学的調査に関する情報を蓄積してきた(たとえば[6,7])。したがって、東濃でのナチュラルアナログ研究では、これらの東濃ウラン鉱床およびその周辺の地質学的特性や地球化学的特性に関する情報を基に、ウラン鉱体部内での天然ウラン系列核種の移行挙動を把握するための放射非平衡調査[8-10]や、岩石(第三紀堆積岩)のウランの収着能力を、定量的に把握するための実験的研究[11]を実施してきている。これらのこれまでの研究成果から言えることは、次の3つの内容にまとめられる[12]。

- (1)天然ウラン系列核種は、鉱物粒子間などの選択的な移行経路沿いに動き、移行経路沿いの鉱物に収着・濃集されること
- (2)収着程度には差こそあれ、ほとんどの構成鉱物が放射性核種を収着し、固定させる能力を有すること
- (3)いったん収着された天然ウラン系列核種は、還元環境下では再移動せずに数十万年以上にわたって固定されること

しかしながら、ナチュラルアナログ研究の基本的な観点からこれらの研究成果を見直した場合に言えることは、「放射性核種は、地質環境中に長期にわたって保持されえる」とする定性的な特性についてのみである。これはこれまでの東濃研究は、アフリカのガボン共和国でオクロ天然原子炉が発見されてきて以来述べられてきた、「地質環境には放射性核種を隔離する能力が

存在するであろう」[13, 14] という地層処分の定性的な基本的概念を確認するにとどまり、定量性やモデルへの適用という点では十分とは言えないことを示している。また処分システムの安全性に対しても、安全評価に用いるモデルなどの有効性についての直接的な検証にはいまだ結びついていない。つまり、従来の東濃ウラン鉱床における研究では、ナチュラアナログ研究としての「類似性」についての追求が不十分であったと言えるだろう。この背景に基づいて筆者は、今後の東濃ウラン鉱床を利用した地質環境の有する長期的な核種隔離性能に関するナチュラアナログ研究としては、処分システムの在り方や安全性の評価に用いるモデルとの「類似性」を明確にして進めるべき段階にきていると強く感じている。

では、どのような「類似性」に関する考え方に基づいたナチュラアナログ研究が、次世代の研究として求められるものなのか。本来放射性廃棄物の地層処分という考え方自体、アフリカのガボン共和国で発見されたオクロ天然原子炉の存在が基礎となってその可能性が示されてきたわけであり[13, 14]、この場合の「天然原子炉」という自然現象は、地質環境中に放射性核種を隔離することの可能性を概念的に示した「類似現象」であるという点で、地層処分システムの具体的なイメージの構築に大きく貢献したとすることができる。しかし、地層処分システムの安全評価に直接的かつ具体的に反映させるために求められるこれからの「類似現象」は、現在世界各国がそれぞれ開発しつつある処分システムの、長期的な安全性を裏づけるような情報を直接提供するものでなければならない。したがって、「天然原子炉」としての天然の臨界現象そのものの議論よりも、地層処分場での地質環境中で想定されるような、個々の普遍的な地球化学的プロセスのナチュラアナログ研究が必要となる。オクロでのナチュラアナログ研究についても、現在フランスを中心に、オクロで生じた現象を地層処分システムの安全評価上理解する必要性のある類似プロセスに細分化して、より直接的に安全評価に反映させるための

研究計画が策定され[15]、すでに研究が進められつつある(たとえば[16])。またオクロだけでなく、その他にも安全評価に用いる地球化学モデルの検証を行ったナチュラアナログ研究の例として、ブラジル Posos de Caldas 地域の Morro do Ferro などでの鉄・トリウム鉱山を利用した地質環境中の核種の移行挙動に関する研究などがあげられる[17]。これらのナチュラアナログ研究では、処分システムの安全評価に対して不可欠と考えられるモデルやデータの信頼性を高めることが、第一の目的として掲げられている。

以上のように、ナチュラアナログ研究の進め方は、最近大きく見直されつつある。また1995年4月には、処分システムの安全評価に対して不可欠と考えられるモデルやデータの信頼性を高めるためのナチュラアナログ研究の基本的考え方について、国際的なコンセンサスを得るためのナチュラアナログ研究専門家会議がIAEA主催のもとウィーンで開催された[18]。筆者もそのメンバーの一員として参加し、現在もナチュラアナログ研究として求められる必要条件についての検討を重ねているが、わが国の処分システムの評価手法の信頼性を高めるために、必要と考えられるナチュラアナログ研究のアナログ(類似)性を確認するクライテリアとして、最終的に次の3つのカテゴリーに分類した考え方に集約されるものと考えている。

- (1)概念モデルの構築 (Conceptual model development)
- (2)安全評価モデルへのインプットデータの提供 (Data provision)
- (3)安全評価モデルの妥当性の確認 (Model testing)

つまり、ナチュラアナログ研究のコンセプトが、これらの3つのカテゴリーに分類上あてはまるかどうか、処分システムのアナログ研究として位置づけられるための判断基準の1つになるものと考えられる。以下に、それぞれのカテゴリーの内容と意味について述べる。

## 2.1 概念モデルの構築(Conceptual model development)

処分システムにおける安全性の評価を行うための概念モデルの構築には、地層処分システムにおける核種の地球化学的挙動に類似する自然現象から得られた情報が基礎になるものと考えられる。つまり自然現象を注意深く観察することによって、より現実的な概念モデルの開発が可能であると言える。この観察の過程で概念モデルを構築するために抽出すべき情報は、①どのようなプロセスを含む現象か、②主たるプロセスは何か、③現象の生じているスケール、そして、④適切な自然法則に基づいてプロセスがモデル化されるかどうか、という点である。ここで述べる概念モデルには、したがって安全評価を行うための観察から得られるスケールやプロセスなどに関する必要最小限のフレームワークを有した情報が示されることが重要である。さらに概念モデルの構築に当たっては、上記の4項目の情報に基づいて、処分システムに生じる地球化学的プロセスと自然現象との類似点を明確にすることがとくに大切であると考えられる。たとえば、数百°Cあるいは数百気圧を超える地質環境下での地球化学プロセスを、処分システムに将来発生する類似プロセスとして位づけることは、発生するプロセスの類似性が認められないことから、おのずとナチュラルアナログ研究としての重要性は薄れることになるだろう。

このように概念モデルを構築するに当たっては、上記の判断要素を通して自然現象研究の基本である「観察」から得られる定性的な情報を基に、処分システムに反映可能なフレームワークを有した概念モデルを構築することが重要である。

## 2.2 安全評価モデルへのインプットデータの提供(Data provision)

ナチュラルアナログ研究にはまず2.1で示したように、自然現象の観察を基に構築された概念モデルを、処分システムの評価モデルの1つに加えることによって、処分システムの評価手

法についての信頼性を向上させる効果があることを述べた。次に示すナチュラルアナログ研究として分類されるカテゴリーでは、自然現象から直接処分システムの評価モデルの予測計算に用いる物理量や化学反応に関する定量的な情報を取得しようとするものである。この考えの背景には、処分システムの安全評価の時間枠は、数万年以上という長期に及ぶことから、短期的な室内試験結果のみならず長期にわたる自然現象から得られる定量的なデータを直接安全評価に用いることによって、処分システムの安全性を高めようとするものである。したがって、この場合においても研究対象となる自然現象は、処分システムの評価上、将来生じると考えられる地球化学的現象と同じ現象を定量的に把握することが重要となる。しかしながら、初期条件があいまいでかつ、複合現象の結果として観察される自然現象を定量的に表現することは難しく、これまでのナチュラルアナログ研究としては、結晶質岩中の割れ目からのマトリックス拡散現象とその拡散幅に関する研究がその代表例としてあげられるのみである(たとえば[19])。

現在の処分システムの安全評価研究の進め方は、室内試験によって得られたデータをインプットデータとして用い、処分システムの長期安全性をシミュレートする方法をとっている。この場合、室内試験手法の妥当性とデータの信頼性を担保する必要がある。室内試験では、①時間的制約が基本的に存在することから、②非常に遅い現象については把握できない可能性が存在する。したがって、このような室内試験の手法から得られた情報の、地質時間スケールでの外挿が妥当であることを確認するためにも、カテゴリー2で示すように自然現象の定量的な解析結果と室内試験結果とを比較することによって、長期的な現象を評価する室内実験方法とデータの双方についての有効性をチェックすることが重要である。

## 2.3 安全評価モデルの妥当性の確認(Model testing)

最後に示すカテゴリーは、安全評価に用いる

モデルやデータを用いて、実際に自然現象の結果やプロセスが表現されるかどうかを確認することによって、独立したモデルやデータ（あるいはデータセット）の妥当性の確認を行おうとするものである。つまり、まったく異なった研究によって整備されたモデルやデータによって、調査対象とする自然現象が適切に解析されるならば、そのモデルやデータを処分システムの安全評価に用いることも可能であろうとする考え方に基づくものである。このようなモデルやデータの適応性ならびに質などを試験する試みは、これまで熱力学データや地球化学コードに対して進められてきており、それらの適応性が確認されつつある（たとえば [20]）。ただし、このようなアプローチは、その他のたとえば核種移行に関するモデルやデータについても実施可能であり、今後それらのナチュラアナログ研究としての実施可能性を追求する必要がある。

これら3つのカテゴリーとナチュラアナログ研究との関係について、簡単に図式化したものを図1に示す。ナチュラアナログ研究では、これらの主に3つの視点から研究対象とする自然現象を分析し、処分システムへの反映先を明確にしていくことが次世代のナチュラアナログ研究を行ううえで重要になるものと考えられ

る。

### 3. 東濃ウラン鉱床におけるナチュラアナログ研究

東濃ウラン鉱床でのナチュラアナログ研究では、還元的地質環境条件下での岩石（堆積岩・結晶質岩）中の核種移行・遅延特性に関する概念モデルの構築を主たる目的として実施している。還元環境下での核種移行・遅延特性に関する概念モデルを構築することは、我が国の処分システムに対して信頼性のある安全評価を実施する上で不可欠であると考えられる。具体的には、スイスの Nagra およびフランスの CEA との共同研究のもと、下記の4項目について実施している [21]。

- (1)還元環境下における熱力学的データベースの信頼性を確認するための調査・試験 (Solubility and speciation of trace elements in reducing conditions)
- (2)堆積岩中の核種移行概念モデルを構築するための調査・試験 (Retardation properties of the sedimentary rock)
- (3)地下水中のコロイドの移行挙動に関する概念モデルを構築するための調査・試験 (Characteristics and transport properties of colloids in reducing groundwater)

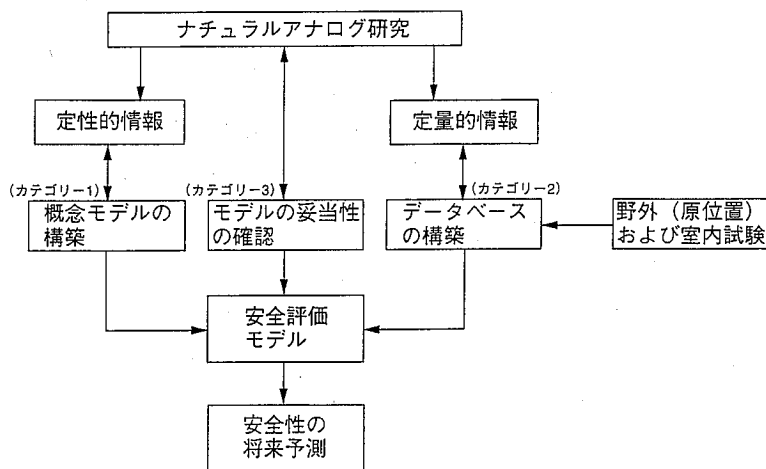


図1 ナチュラアナログ研究のフレームワーク (IAEA 1995 に一部加筆)

(4)坑道掘削による坑道周辺の酸化還元フロントの形成に関する概念モデルを構築するための調査・試験(Characterization of geochemical disturbance around the gallery)

これらの研究項目は、地層処分システムの安全性の評価において処分場の操業から閉鎖後にかけての、坑道周辺のニアフィールドからファーフィールドの還元的地質環境条件下での核種の地球化学的挙動の類似現象として、概念モデルの構築(カテゴリー(1))ならびに既存モデルの妥当性の確認(カテゴリー(2))を目的に実施するものである。現在は図2および3に示すように、東濃鉱山においてウラン鉱体部付近で上記の研究目的に最適と考えられる場所の特性調査を主体に行っている段階である。以下にそれぞれの研究目的、内容および今後の計画について述べる。

### 3.1 熱力学的データベースの信頼性確認試験

東濃ウラン鉱山においては、ナチュラルアナログ研究の実施のために本延坑道から45度傾斜のウラン鉱化部を通過する坑内試錐(KNA-6号)を行い、地質調査(BTV・孔内物理検層

を含む)・水理調査・地下水の地球化学調査を総合的に進めている(図3)。最終的には、パッカー式の地下水採水装置を試錐孔内に埋設することにより、ウラン鉱化部、不整合部、基盤花崗岩部の3点から(これまでの調査から、これらの3地点ともに湧水のあることが確認された)、地下水の採取と、地下水組成および間隙水圧の長期モニタリングを行う予定である。不整合付近の地下水組成ならびに物理化学パラメータ(温度・電気伝導度・pH・Ehなど)については、これまでに数年間以上のモニタリング調査を行ってきており、データが蓄積されつつある(表1、[22])。しかしながら、熱力学的解析に必要なデータベースの信頼性を確認するためには、岩石と地下水が反応していることが明確な場所での双方の試料が必要なことから、できるかぎり異なる岩石種でしかも湧水の認められる箇所からの試料採取が重要となる。

本試験では、ウラン鉱化部、不整合部、基盤花崗岩部の地下水および岩石中におけるウラン系列核種を含む微量元素(たとえばPd、Sn、Ni、Co、Sr、Cs、Ra、Se、REE)の濃度および存在形態を安全評価に用いているモデルと原位置

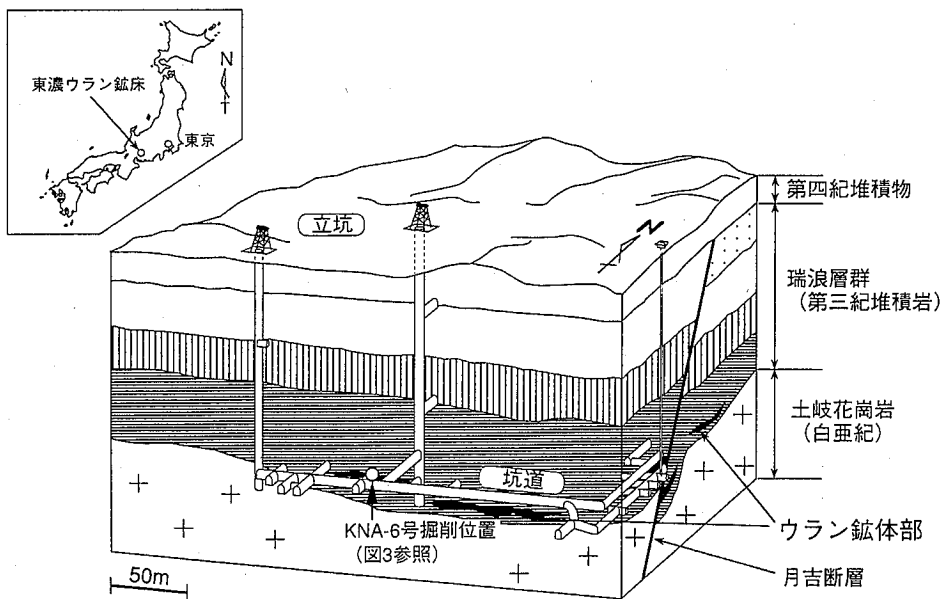


図2 東濃ウラン鉱床概念図

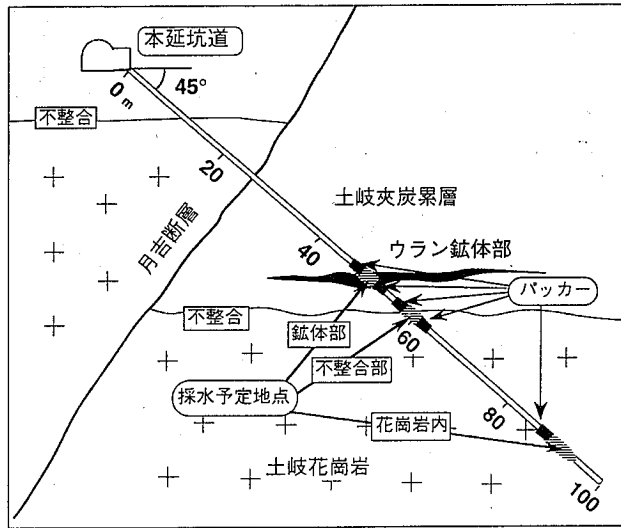


図3 KNA-6号孔試錐および原位置試験レイアウト

表1 ウラン鉱体部付近地下水組成一覽 (Seo & Yoshida, 1992 より)

Sampling level : GL -153 to -155 m						
pH		Eh	DO	EC	Temp.	
9.1- 9.2		-300mV	0.0ppb	168μs/cm	18.5°C	
Concentration (ppm)						
Si	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
8.1	<0.02	<0.02	0.02	1.98	45	0.29
F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	U (ppb)	
4.1	1.06	1.26	79	8.0	<0.10	

での測定結果とを比較することによって、既存の地球化学コードにおける熱力学データの妥当性の確認を行おうとするものである。とくに還元状態が維持されたままでの原位置の測定データは、極めて少ないことから還元状態と考えられる処分場近傍の母岩における地質環境条件の予測に欠かせない研究課題である。

### 3.2 堆積岩中の核種移行特性の把握およびモデル化

これまでのKNA-6号試錐岩芯試料の観察と放射能検層およびBTV調査から、月吉断層後の堆積岩(瑞浪層群の土岐夾炭累層に当たる)

中の割れ目沿いに、ウラン濃集の著しい部分の存在することが認められており、割れ目を透過する地下水とウランの濃集プロセスとの関係についての情報が得られるものと思われる。これまでの核種移行特性に関する研究では、鉱物粒界や鉱物中の微小空隙の移行経路としての役割に注目して天然ウラン系列核種の放射非平衡調査を行ってきた。図4は、ウラン鉱化部の割れ目などのない基質部から採取した試料の全岩および鉱物分離した主要構成鉱物ごとの、ウラン系列核種間(<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U、<sup>230</sup>Th/<sup>238</sup>U)の放射能比を示したものである[9]。調査の結果からは、黄鉄鉱を除いた構成鉱物中では天然ウラン系列

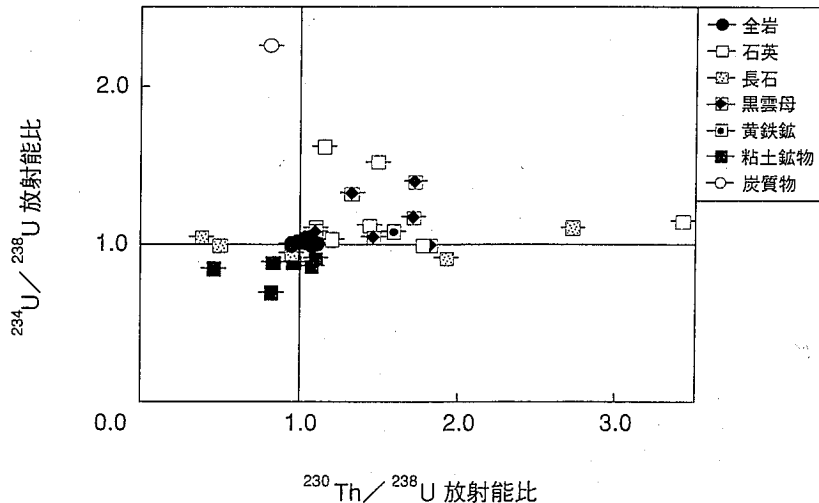


図4 ウラン鉱体部の全岩および主要構成鉱物の放射非平衡調査結果

核種が放射非平衡状態であるものの、全岩では放射平衡状態であることが認められた。つまり、構成鉱物ごとには、過去のウラン系列核種間の放射平衡が成立する期間内(ウラン系列の場合、放射平衡に達するのに約 100 万年を要する)に地下水間との反応によって、ウランの溶脱や濃集が生じたものと考えられる一方で [23,24]、全体としてはほとんど移動していないことを示すものである。しかしながら、基質部に割れ目などの選択的な移行経路が存在する場合の核種移行特性に関しての詳細な調査はなされておらず、今回の調査研究によって堆積岩中の移行特性の1つとして、割れ目周辺の移行・遅延特性が明らかになれば、これまでナチュラルアナログ研究としては、ほとんどその具体的事例の報告されていない堆積岩中割れ目からのマトリックス拡散に関する概念モデルの構築や、原位置での拡散係数などの定量的な情報が得られる研究となることが期待される。

### 3.3 地下水中的のコロイドの移行挙動の把握およびモデル化

地下水中的のコロイドの移行挙動に関する研究では、コロイドの種類や量ならびに、核種移行への関与の度合いを明確にすることがまず現時

点での最重要課題と言える。したがって、調査結果によっては、処分システムの安全評価の枠から除外することも想定される。

これまでのナチュラルアナログ研究の成果としては、必ずしもコロイドと天然に存在する放射性核種との相関が正であるとの結果は得られていない(たとえば [25])。しかしながら、これまでの研究例は、そのほとんどが酸化状態の地質環境下での特性調査が主体であり、還元状態であろうと考えられるファーフールドの地質環境下でのコロイドと核種との相関に関する情報は、皆無に等しい。したがって、東濃における調査研究によって還元環境下でのコロイドによる核種の移行挙動のメカニズムが具体化されれば、処分システムの安全評価の枠に含めるかどうかという判断も含めて、直接的に処分システムの安全性評価に反映できるものと考えられる。

### 3.4 坑道周辺の酸化還元反応の把握およびモデル化

坑道周辺の状態の変化は、坑道掘削による人為的な擾乱と水理や地球化学的な条件の変化が重なり合った複雑な現象として生じる可能性がある。現在、この坑道周辺の状態変化に関する



研究は、EDZ(Excavation Damaged Zone) 研究として坑道周辺の具体的な概念モデルを構築するために世界各国の地下研究施設で進められているのが現状である(たとえば [26])。

本研究では、とくに坑道周辺の地球化学的な条件の変化に注目して、EDZでの地球化学的な変化の概念モデルを構築することを目的として進めているものである。調査は、東濃鉱山内の本延坑道に認められるウラン鉱体部の露頭で行う予定である。この露頭のある坑道部分は、昭和48年に掘削されたものであり、これまで約23年間にわたって大気に触れていることが判明している。つまり、本来還元状態であったウラン鉱体部に空気(酸素)が侵入することによって酸化・還元フロントが坑道周辺の岩石中に形成されていることが考えられる(図5)。したがって、坑道壁面から酸化・還元フロントまでの距離が測定されるならば、酸化・還元フロントの形成速度と坑道周辺の岩石が有する酸素消

費能力が見積もられることになる。これらの情報は、処分場の操業期間に坑道周辺に発生すると思われる化学的現象の概念モデルの構築に役立つと同時に、坑道周辺の空間維持に化学的に適した材料の選定などの処分技術の開発に反映できる情報も提供するものと思われる。

坑道周辺のEDZに関する概念モデルの構築は、地球化学の領域のみならず岩盤力学や水理の観点からも把握されるべき課題であり、今後東濃鉱山などの地下空間を利用した研究としてさらに進められるべき研究内容であろう。

#### 4. まとめおよび今後のナチュラルアナログ研究の方向について

本論では東濃ウラン鉱床で実施している地質環境中での天然ウラン系列の地球化学的挙動に関する研究を例に、これからのナチュラルアナログ研究として求められる必要条件を提示するとともに、今後進めるべきナチュラルアナログ研究内容とその進め方について述べてきた。ナチュラルアナログ研究の意義は、処分システム概念や安全評価に用いるデータやモデルとの結びつきを明確にしたうえで、処分システムの評価手法の信頼性を向上させることにある。そのためのナチュラルアナログ研究のコンセプトとして求められる必要条件是、①概念モデルの構築(Conceptual model development)、②安全評価モデルへのインプットデータの提供(Data provision)、そして、③安全評価モデルの妥当性の確認(Model testing)の3つのカテゴリーに集約されるものと筆者は考えている。東濃ウラン鉱床を活用したナチュラルアナログ研究では、この考え方に基いてわが国の地質環境中で生じた天然ウラン系列核種の地球化学的挙動に注目し、地質・水理・水質などの幅広い基礎的情報を蓄積を行いつつ、わが国の処分システムの安全性評価に反映させるための研究項目に焦点を絞って研究を進めてきており、今後より処分システムの安全評価に用いている手法とのデータやモデルの観点からの結びつきを高めて実施していくつもりである。

ナチュラルアナログ研究の基本的考え方とし

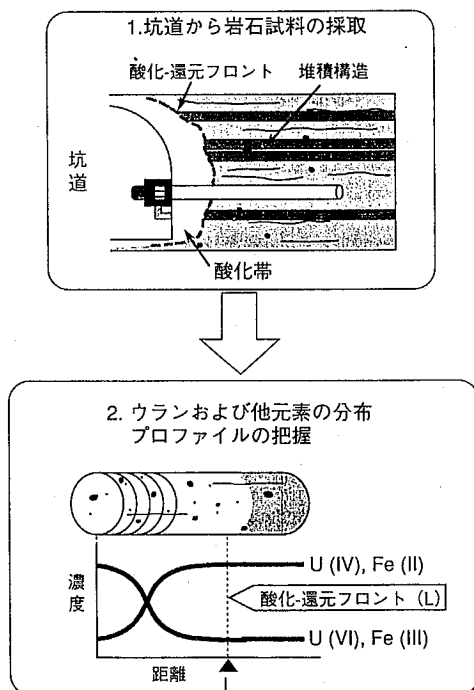


図5 坑道周辺の酸化還元反応の把握およびモデル化に関する研究方法

て、処分システムの安全評価手法との結びつきに重点が置かれるべきであるという観点に立てば、処分システムへの反映先が明確にされていれば、自然界に認められる地球化学的現象を活用し、さまざまなナチュラルアナログ研究が実施可能であることも考えられる。たとえば、東濃や釜石の花崗岩中の割れ目や割れ目帯、断層破碎帯からの酸化・還元反応による核種のマトリックス拡散に関するナチュラルアナログ研究を、東濃地科学センターにおいてすでに行っている。これは割れ目媒体中における処分場閉鎖後の、地下坑道周辺の一旦酸化されたあとの核種移行現象に関するナチュラルアナログ研究として筆者らは行っているものである。ただし、このような研究においても、先に示したカテゴリーによる位置づけについての吟味が重要であることは言うまでもない。

ナチュラルアナログ研究は、処分システムの安全性を向上させるために非常に重要な研究課題である。今後もその進め方と活用に仕方について、東濃でのナチュラルアナログ研究を通して考察を続けていきたいと筆者は考えている。

## 5. 謝辞

本解説論文を作成するに当たって、(財)エネルギー総合工学研究所の村野徹博士、東海大学工学部の大江俊昭助教授ならびに、動燃東濃地科学センター山川稔博士、湯佐泰久博士、動燃本社武田精悦氏には、非常に有意義な議論をしていただいた。また、日本原子力研究所の中山真一博士には、投稿の機会を与えていただいた。心より、感謝いたします。

## 6. 引用文献

[1] Come, B. and Chapman, N.A. (editors): Natural analogue working group 1st meeting, Brussels, November 1985, CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 10315(1986).  
[2] IAEA: IAEA Technical Report, 304 (1989).

[3] Miller, W. et al.: Natural analogue studies in the geological disposal of radioactive wastes, *Studies in Environmental Science* 57, 395 Elsevier(1994).  
[4] Mckinley, I.G. and Alexander, R.: *Waste Management*, 12, 253(1992).  
[5] Petit, J.C.: *Radiochim. Acta*, 52/53, 337 (1991).  
[6] Doi, K. et al.: *Econ. Geol.* 70, 628 (1975).  
[7] 小林孝男: 鉱山地質, 39, 79(1989).  
[8] Nohara, T. et al.: *Radiochim. Acta*, 58/59, 409(1992).  
[9] Yoshida, H. et al.: *Radiochim. Acta*, 66/67, 505(1994).  
[10] Yoshida, H.: *Applied Geochemistry*, 9, 479(1994).  
[11] Yoshida, H. et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 31, 803(1993).  
[12] 吉田英一、湯佐泰久: 同位元素研究発表会特別講演要旨、p. 206(1995).  
[13] IAEA: IAEA Technical Report, STI/PUB/405(1975).  
[14] IAEA: IAEA Technical Report, STI/PUB/475(1978).  
[15] Chapuis, A.M. and Blanc, P.L.: CEC Technical Report, EUR 14690(1993).  
[16] 日高洋: 地球化学, 28, 143(1994).  
[17] Chapman, N.A. et al.: *J. Geochem. Explor.*, 45, 24(1992).  
[18] IAEA: IAEA Technical Report (in press)(1995).  
[19] Alexander, W.R. et al.: *Mater. Res. Soc. Proc.*, 261, 567(1990).  
[20] Bruno, J. et al.: SKB Technical Report, TR 90-20(1990).  
[21] Yoshida, H. et al.: CEC Report, EUR series (in press)(1995).  
[22] Seo, T. and Yoshida, H.: CEC Report EUR 1103 EN, 462(1992).  
[23] Thiel, K. et al.: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 65, 249(1983).

[24] Scott, R.D. et al. : *J. Geochem. Explor.*,  
45, 323(1992).

[25] Seo, T. : Uranium distribution in the  
colloidal and solute phases at the Koongara  
uranium deposit, Alligator River Analogue  
Project Second Annual Report(1991).

[26] OECD/NEA : Excavation Response  
in Geological Repositories for Radioactive  
waste, Proc. of an NEA Workshop(1989).