

特集

ナチュラルアナログ

ナチュラルアナログ研究のすすめ[†]湯佐泰久^{††}

放射性廃棄物の地層処分システムにおいて発生すると想定されるプロセス、それらに類似する天然のプロセスはナチュラルアナログ (Natural Analogue) と呼ばれている。ナチュラルアナログを研究することにより、地層処分システムの性能評価手法の妥当性の立証などに有効な情報や知見を提供することができる。それには、①処分システム上のどのプロセスの、何のための研究かを理解すること、②研究対象としてのナチュラルアナログを天然の現象や材料の中から選ぶ際にはそれらの長所・短所をよく把握すること、そして、①と②を考慮して、③ナチュラルアナログ研究のフレームワークを構成すること、が必要である。その他、ナチュラルアナログ研究の今後の展開についても説明した。

“Natural analogues” can be defined as the processes analogous to those operating in the geological isolation system of radioactive waste. Natural analogue studies provide the most convincing support to the long-term performance assessment of the geological isolation system. In this paper, the properties of the natural materials, from which the appropriate natural analogues are selected, are described as the historical materials. Significance of natural analogue studies concerning stability of the engineered barriers are briefly reviewed, and application and further development of the natural analogue studies are also discussed.

1. ナチュラルアナログとは何か

1.1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分システムにおいて発生すると想定されるプロセスに類似する天然のプロセスはナチュラルアナログ (Natural Analogue) と呼ばれている [1]。高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの長期的な性能を評価するうえで、ナチュラルアナログの研究は室内実験などでは得られない、天然環境下での、各種のプロセスの長期にわたる情報や知見が得られる唯一の方法である。筆者は動燃の東海事業所において人工バリア材の挙動に関するナチュラルアナログ研究 [2-8] を、また、東濃地科学センターでは東濃ウラン鉱床のナチュラルアナ

ログ研究 [9, 10] を進めてきた。ここではそれらの研究を通して、ナチュラルアナログ研究の考え方・進め方や今後の展開について、筆者の考えを述べてみたい。

1.2 ナチュラルアナログ研究への期待

地層処分は、地層 (Geological Formation) の持つ地質環境 (Geological Environment) を活用して、長期にわたり放射性廃棄物を人間環境から安全に隔離する方法である。高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合には、廃棄物を隔離するために、廃棄物ガラス、オーバーパック、緩衝材などからなる人工バリアと、地質環境からなる多重バリアシステムが考えられている。この多重バリアシステムの長期性能については、性能評価モデルを用いた数値計算によって予測する方法が考えられており、そのモデルの妥当性を立証する必要がある。このための有力な方法として、長期の時間スケールで進行したさまざまな天然のプロセスの中から、地層処分

[†]Significance of Natural Analogue Studies for Geological Isolation of Radwaste, by Yasuhisa Yusa

^{††}動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センター Tono Geoscience Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

表1 Comparison between laboratory experiments and natural analogue studies(Yusa et al.)[4]

	Laboratory Experiments	Natural anal. studies
(1) Materials	Candidate's	Analogue
① Number	Many	Solitary, few
(2) Environmental (Experimental) Condition	Simple, Uniform Constant, Controlled Common Small Scale	Complicated Variable Individual Large Scale
(3) Period	Short-term	Long-term
(4) Results	Independent variables Discrimination among conditions is possible	Overprinting of factors Restoration is difficult

システムの性能を評価するうえで有益な類似のプロセス(ナチュラルアナログ)を選び出し研究する「ナチュラルアナログ研究」がある。

人間の行う実験は数年程度の短時間に限られる。これに対し、ナチュラルアナログは自然が非常に長い時間をかけて行った実験とみなすことができる。(ナチュラルアナログ研究と室内実験との長所・短所の比較を表1に示す[4]。また、その議論を別の機会[11]に述べたのでこちらも参照されたい。)そのため、地層処分システムの超長期にわたる性能を予測するうえでの貴重な情報や知見をナチュラルアナログ研究は提供すると期待され、世界中で積極的に行われている。

アフリカ、ガボン共和国オクロのウラン鉱床には世界で唯一の天然原子炉があり、「高レベル放射性廃棄物が安全に地層処分された実例」として、広く知られているナチュラルアナログである。(本特集号の大貫らの研究報告[12]を参照。)

1.3 ナチュラルアナログ研究のテーマ

今までに報告されているナチュラルアナログ研究のテーマには次のような項目がある(たとえば[13])、

- (1)人工バリア材料のナチュラルアナログ研究
 - ①ホウ珪酸ガラスの変質・長期安定性、②キャニスター材の腐食・長期安定性、③ベントナイトの緩衝性の劣化・長期安定性
- (2)放射性核種の移行・固定に関するナチュラル

アナログ研究

①ウラン鉱床の成因・保存、②放射性核種の化学種と溶解度、③移行プロセスにおける放射性核種の遅延、④酸化・還元条件
なお、世界各国で実施されているナチュラルアナログ研究の現状については、1994年に出版されたMiller et al. [14]の本にまとめられているのでそれを参照されたい。

2. ナチュラルアナログ研究の考え方・進め方

2.1 適切なナチュラルアナログを選択するために

天然現象はもともと条件をコントロールした実験ではないので、地層処分システムに類似したナチュラルアナログを見つけることは簡単ではない。また、天然現象の結果を定量的に解釈するのは困難な場合が多い。なぜならば、天然に存在している材料は歴史的な材料(史材)であって、そこにはさまざまなプロセスが重複して生じている可能性が高い(杉本、浜田[15])からである。とくに古い、長期間経過している史材になればなるほど、若い史材に比べて各種のプロセスが重複したり、得られるデータの質・量がともに減少し、過去の環境条件の復元がより困難な場合が多いと言える[4]。

筆者はこのような検討の結果、人工バリアのナチュラルアナログ研究を開始するに当たって、比較的若い時代の、しかも単純な歴史を示すナチュラルアナログを選択することを研究方針とした(図1)[4]。たとえば、廃棄物ガラスのアナログ研究の対象として約3000年前より若い火山ガラスを研究対象として選択したのも

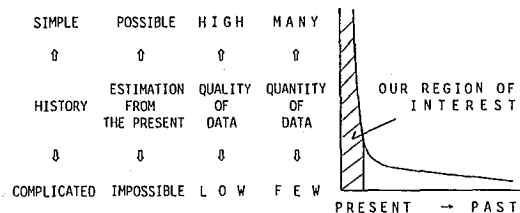


図1 Properties of historical materials (Yusa et al.) [4]

[2, 5]、古気候学的な検討から、反応に関与した水の量などが推定できるためである。

実験では得られないような時間的一空間的スケールでの定量的なデータを取得することが可能となるような、適切なナチュラルアナログをいかに選択できるか否かが、ナチュラルアナログ研究の成功の鍵を握っていると言える。どのような天然現象がナチュラルアナログとして活用可能かどうかを判断する目が研究者に求められる。

2.2 性能評価研究に役立つナチュラルアナログ研究を

ナチュラルアナログが冒頭に述べたように「地層処分システムにおいて発生すると想定されるプロセスに類似する天然のプロセス」と定義されるのであれば、さまざまな研究項目が考えられる。しかし、これまでに公表された多くのアナログ研究の成果の中には、地層処分システムのどのプロセスに類似するのが明確に示されていない例や、とても処分システムには想定されないような現象を研究対象としている例が見られる。

1984年、Chapmanら[13]は、それまでの研究事例を検討し、ナチュラルアナログ研究に求められる条件を次のように整理した。

- ① 処分システムに想定されるプロセスに類似する地球化学的プロセスであること。
- ② 対象とするプロセスが他のプロセスと明確に区別できること。
- ③ 物理化学的パラメータ（温度、圧力、濃度等）が独立して測定できること。
- ④ 初期条件、境界条件がわかること。
- ⑤ タイムスケールがわかること。

ナチュラルアナログ研究が性能評価に有効に利用できるか否かは、研究対象とするナチュラルアナログが上記の5つの条件をどの程度満たしているかによって決定されるとしている。彼らの対象とした事例は高レベル廃棄物の、しかも、結晶質岩の場合がほとんどであるが、この考え方は現在でも、そして、堆積岩や低レベル処分システムの場合でも有効であると考えられ

る。

近年、Chapman and Miller [16] はさらに再検討し、ナチュラルアナログ研究の反映先について議論した。そして、ナチュラルアナログ研究は、①概念モデルの構築、②評価モデルに用いるデータの提供、③評価モデル、コード、データベースの検査、の3つのどれかに利用できるものでなくてはならないと主張した。(これらの事情については本誌の吉田の解説 [17] を参照されたい。)

具体的に自分の実施しようとするナチュラルアナログ研究は処分システムとシナリオのうえで、どのプロセスを対象としているのか、そして上記3点のどれに利用できるのかを充分、認識しておく必要がある。

2.3 人工バリア材料のナチュラルアナログ研究の考え方・進め方

人工バリア材料の挙動に関するナチュラルアナログ研究を開始するに当たって、Yusa et al. [4] では次のような考え方をとった。

ナチュラルアナログ研究は人工バリア材の長期耐久性などに関する定量的なデータが得られる唯一の方法である。しかし、天然の事例であることから、必ずしも研究対象である天然類似材「史材」が地層処分システムの人工バリア材料とは同一ではない。また、研究対象である天然類似材料は「史材」であるが、その環境条件の履歴がすべて把握できるとは限らない。

したがって、ナチュラルアナログ研究で定量的なデータを得るためには、(1)可能なかぎり、人工バリア材に類似する性質を持つ天然のアナログ材料を選ぶこと（これはChapmanら[13]の条件①に相当する）、(2)実験条件ともいべき環境条件が比較的単純であって、しかも定量的に把握できるケースを選ぶこと（Chapmanら[13]の条件②～⑤に相当）、が重要と考えた。さらに、これだけではアナログ研究にとどまるので、処分候補材料とアナログ材料との性質の差異、およびアナログ材料の変質時の条件と処分環境下で想定される条件との差異を埋めるために、(3)温度条件や材料の組成などを変化させ

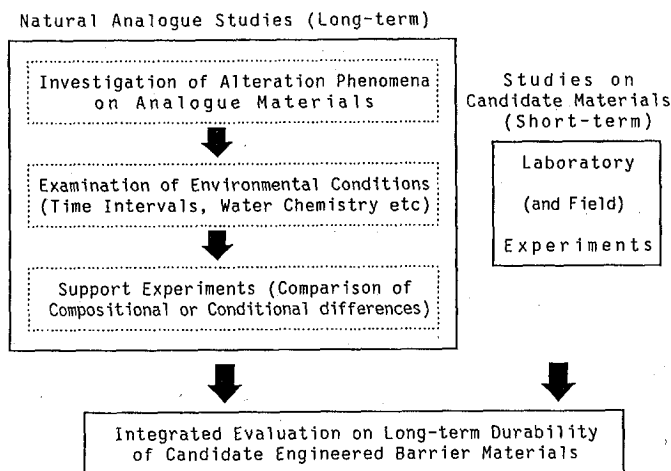


図2 Framework of analogue studies on engineered barrier materials (Yusa et al.) [4]

た室内実験などを行い、これらの試験結果との比較により総合的に評価できるようにすることも必要と考えられる。

言い換えれば、人工バリア材料のナチュラルアナログ研究は次の3要素、①天然の事例研究(天然アナログ材料の腐食・変質調査)、②環境条件の定量測定、③各種比較試験の実施からなる(図2)[4]。

このような考えのもとに研究した結果、次のような成果が得られている。

- ①廃棄物ガラスの組成に類似した、富士山および伊豆大島の(玄武岩質)火山ガラスの変質速度は1000年間で千分の数ミリであった。この場合、変質時間だけでなく、関与した地下水の温度、水量や水質についても数量的に把握できた[2,5]。
- ②(玄武岩質)火山ガラスと(ホウ珪酸)廃棄物ガラスの浸出試験の結果、両者には大きな違いは認められなかった(笹本ら[18]および本特集号の三ツ井らの報告[19]を参照)。
- ③天然ベントナイトが100~160°Cの温度で、海水に類似する組成の地下水と、200万年間、接していてもほとんど変質は認められなかった[3,7,8]。
- ④さらに、ベントナイト中の廃棄物ガラスのナチュラルアナログとみなすことができる

例として、千葉県鴨川の泥岩中の火山ガラスを研究した。この場合、泥岩は(緩衝材としての)ベントナイトに、火山ガラスは廃棄物ガラスに、それぞれ対応する複合システムのナチュラルアナログ研究になる。その結果、100万年間でも火山ガラスはほとんど変質していなかった[6,20]。

これらの成果から、「ベントナイト中の廃棄物ガラスは処分システムで想定されるものと類似の期間・条件では、ほとんど変質しない」、と言えるようである。

2.4 なぜ、ウラン鉱床のナチュラルアナログ研究を進めるのか?

ウラン鉱床、とくに堆積性ウラン鉱床は地下水中のウランが吸着・沈澱のプロセスにより形成されたと考えられており、その成因モデルは図3のように表すことができる(Ruzicka[21]を一部修正)。

ウランと超ウラン元素との地球化学的な挙動の類似性から、地層処分についても図3のようなモデルを考えることができる。異なる点は、“SOURCE”と“TRANSPORT”、および“DEPOSITION”を人間が行うということである。

言い換えれば、「ウラン鉱床は処分システムの(化学的な)アナログ」とみなすことができ、(1)

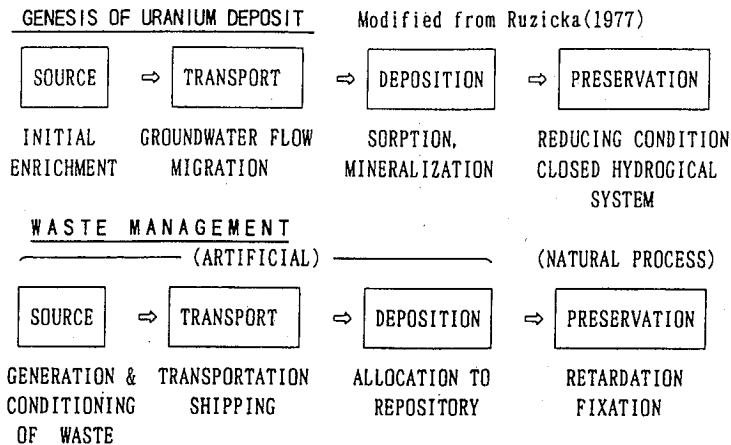


図3 Uranium Deposit as an analogue of geological isolation system (Yusa et al.) [9]

ウラン鉱床に起きた現象は地層処分システムに起こり得る現象に類似する現象であり、堆積性のウラン鉱床は、①岩石からのウランの溶脱、②地下水による移行、③鉱物による吸着・固定現象、さらに、④その保存条件、などのプロセスについて格好の研究の場を与えてくれると言える。また、(2)ウラン鉱床の「保存」に適した地質環境条件から処分システムの長期隔離性能に関する基礎的な情報や知見を得ることができる。ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究が、世界各国で行われているのはこの理由によると考えられる（オーストラリアのクングラウラン鉱床の研究例として大貫らや柳瀬らの本特集号の論文 [22, 23] を参照されたい。）

動燃東濃地科学センターでは地層に関する基礎的研究である「地層科学研究」の一環として、東濃ウラン鉱床を利用して、ウランなどの天然放射性核種の移行・固定に関する研究を進めており、それも上記のような考え方を基盤とするものである。さらに、東濃ウラン鉱床を研究対象にすることにより、その成果はわが国の地質環境下での実例として理解することができる、という利点もある。

これまでの研究の結果、次のようなことがわかってきた [10]。

- ①約 1000 万年前に形成された東濃ウラン鉱床は、さまざまな地殻変動（隆起—沈降、

海進—海退、断層運動）などを受けてきたにもかかわらず、保存され続けてきた。

- ②これらは、主として、還元環境という地球化学的条件が保たれたためと考えられる。

これらの研究により、わが国の地質環境下でも、長期間にわたって放射性物質を隔離することが可能であるという類似の実証例を示すことが可能となる。

（東濃ウラン鉱床のナチュラルアナログ研究の現状とその課題については本特集号に吉田の解説 [17] もあるので、それを参照されたい。）

3. ナチュラルアナログ研究の新たな展開

3.1 要素研究からシステム研究へ

ナチュラルアナログ研究の新たな展開としてそのシステム研究化がある。たとえば、前述の人工バリア材のナチュラルアナログ研究 [2-8] は各要素研究からなるシステム研究の一例である。この研究は、温度条件や材料の組成などを变化させた比較実験 [18, 19] や、人工バリア候補材そのものの性能把握のための実験 [24-28] など、実験室での研究と組み合わせた研究展開を図ることが必要である (図2) [4]。このことにより、人工バリア候補材の長期性能を定量的に言及することが可能となる。後者の人工バリア候補材の性能把握のための実験にはたとえ

ばガラスベントナイトー水などからなる複合系での大型実験も含めるべきである[11]。このアプローチは個々の要素研究のみならず、それらを有機的に組み合わせたシステム研究であると言える。

3.2 システム研究としての古水理地質学 (Paleohydrogeology)

一方、地質環境のナチュラルアナログ研究についても長期的には「古水理地質学 (Paleohydrogeology)」というシステム研究へと展開していくと考えられる [29]。

ある地質媒体中での地下水の現時点での流動に関する研究は水理学に含まれる。この研究には、表層水理測定による地下水涵養量の把握、試錐孔を用いた岩盤の透水係数や間隙水圧の測定、有限要素法などを用いたコンピューターによる地下水流動解析、といった調査・研究が含まれる。

さらに、ある地質媒体中での地下水の過去から現在までの流動を明らかにする研究は「古水理地質学」と呼ばれる。この場合、過去の地下水涵養量、岩盤の透水係数や間隙水圧、といった数値を直接測定することは不可能であり、古地形学、古気候学、地球化学といったさまざまな知見や情報から当時の水理状況を推定する作業が必要である。たとえば、当時の地下水より析出したと考えられる鉱物の化学組成から、共存していた地下水の水質を逆算することができる。地下水の水質は水-岩石相互反応により規制されているので、地下水の化学組成より地下水流動の知見が得られる [29]。

このような研究はある地質環境の水理学的性質の長期的変化を研究するものであり、ナチュラルアナログ研究の1つとも言える。しかし、Chapman & McEwen [29] はナチュラルアナログ研究という言葉は範囲が広く、好ましくないと述べ、代わりに、「古水理地質学 (Paleohydrogeology)」という言葉を用いるべきであるとしている。

「古水理地質学」という用語は石油やウランの探査に利用する目的で、古くから用いられて

いる用語であり、近年でも、Sanford[30]は(数百 km²の広がりを持つ)コロラド盆地について、顕生代(約4億年)にわたる水理学的な変遷を研究している。Chapman & McEwen [29]はこの研究を地質学・地球化学・水理地質学のシステム研究と捉え、ある地質媒体中についての古水理地質学的研究は統合した性能評価手法の確証のための良い練習の場になると考えた。さらに、Yusa et al. [9]は東濃鉱床のようなウラン鉱床について古水理地質学的研究を行う有利さを強調し、その場合は地質学・地球化学・水理地質学の統合だけでなく、物質(天然核種)移行・固定研究も統合された性能評価手法の確証を目指す際の良い練習の場になると主張した。

古水理地質学の研究はまだ未成熟であり、古地理の復元など各要素にわたって取り組むべき点が出ているが、地質環境の(広義の)ナチュラルアナログ研究として、そして、統合した性能評価手法の確証のための唯一の練習の場を与えるものとして、今後目指すべき方向であると考えられる。

3.3 社会的受容性のあるナチュラルアナログ研究を!

1988年、CEC主催の第3回ナチュラルアナログ研究ワーキンググループ会議の概要報告 [31]にも見られるように、ウラン鉱床のナチュラルアナログ研究などは、技術的な意義だけでなく、地層処分という概念に関するパブリックアクセプタンス (PA) を得るのにも有効であると言われている。しかし、1990年、CEC主催の第4回ナチュラルアナログ研究ワーキンググループ会議では、PAを得ることを念頭においたナチュラルアナログ研究の事例はほとんどないが、今後、実施されるのが望ましい、との意見が出ている [1]。たとえば、ホルミシスに観点を置いたナチュラルアナログ研究などは、場合によってはPAを目的とした研究になるかもしれない。

3.4 独創性のあるナチュラルアナログ研究を!

興味深い研究が埼玉大学工学部地盤水理実験施設の渡辺から発表されている [32, 33]。渡辺は弥生時代の古墳の内部が現在でも乾燥状態に保持されている場合があるのに注目し、その内部構造を詳しく調べた。そして、その結果から低レベル処分場の構造を具体的に提案している。これは従来の地球化学的ナチュラルアナログ研究の範囲を超えた、わが国らしいアナログに対する独創的な研究である。その成果は Aptedら [34] によって工学的に展開され、具体的な低レベル場の建築物の構造設計への提案となっている。さらに、同様な考古学的なナチュラルアナログ研究が即身仏入窟についても展開されている (本特集号の渡辺らの報告 [35] を参照のこと)。このような独自の着想に基づく研究が続くことを切に希望する。

4. おわりに

スペインの偉大な建築家アントニオ・ガウディは彼の弟子にこう語ったと言われている。「全ては自然によって書かれた偉大な書物を学ぶことによって生まれる。人間の作る作品は全てこの書物に書かれている。自然の偉大な書物を学び、自然を模倣し、その構造 (システム) がどのようなになっているかを考えなければならない。」地層処分の長期の安全性を証明するためにも、研究開発の課題をよく理解し、自然の無数の事例の中から、地層処分に想定されるプロセスに類似する事例 (ナチュラルアナログ) を適切に摘出することが必要である。このような能力 "Serendipity" が研究者に求められる。そして、具体的に各種の研究手法を駆使し、地層処分システムの性能評価に有用な成果を得ることが期待される。

5. 謝辞

動燃東海事業所において実施した、人工バリア材料に関するナチュラルアナログ研究の共同研究者である同事業所地層処分研究開発室の亀井玄人副主任研究員、および新井隆氏 (現 電源

開発(株)、東濃ウラン鉱床のナチュラルアナログ研究の意義について議論してきた東濃地科学センターの吉田英一博士、さらに、原稿を読んでコメントをいただいた佐久間秀樹主任研究員に感謝いたします。

6. 参考文献

- [1] Come, B. and Chapman, N.A. (ed.) : CEC Nucl. Sci. Tech. Report, **EUR 13024** (1991).
- [2] Arai, T. et al. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **127**, 73 (1988).
- [3] Kamei, G. et al. : *ibid.*, **176**, 657 (1990).
- [4] Yusa, Y. et al. : CEC Nucl. Sci. Tech. Report, **EUR 13014** (1990).
- [5] 湯佐泰久 他 : 原子力誌, **33**, 890 (1991).
- [6] 亀井玄人 他 : 日本原子力学会 1991 秋の大会、予稿集 J 43 (1991).
- [7] Kamei, G. et al. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **257**, 505 (1992).
- [8] 亀井玄人 他 : 資源地質, **43**, 365 (1993).
- [9] Yusa Y. et al. : Paleohydrogeological Methods and Their Application, OECD/NEA, 117 (1993).
- [10] 湯佐泰久、吉田英一 : 放射線, **20**, 29 (1993).
- [11] 湯佐泰久 : 原子力誌, **7**, 996 (1995).
- [12] 大貫敏彦 他 : 放射性廃棄物研究, **2**, 145 (1996).
- [13] Chapman, N.A. et al. : SKB/KBS Technical Report **84-16** (1984).
- [14] Miller, W. et al. : NAGRA Tech. Rep. **93-03** (1994).
- [15] 杉本大一郎、原田隆士 : 宇宙地球科学、東京大学出版会 (1975).
- [16] Chapman, N.A. and Miller, W. : CEC Nucl. Sci. Tech. Report, **EUR 15176** (1993).
- [17] 吉田英一 : 放射性廃棄物研究, **2**, 93 (1996).
- [18] 笹本広 他 : 日本原子力学会 1992 秋の大会予稿集 F 27 (1992).
- [19] 三ツ井誠一郎 他 : 放射性廃棄物研究、

2、102 (1996).

[20] 動力炉・核燃料開発事業団：地層処分研究開発の現状(平成5年度)、PNC TN 1410 94-094 (1994).

[21] Ruzicka, V.: Geol. Surv. Can. Paper 77-1A, 17 (1979).

[22] 大貫敏彦 他：放射性廃棄物研究、2、137 (1996).

[23] 柳瀬信之 他：同、2、121 (1996).

[24] 柴田雅博、亀井玄人：動燃技術資料、PNC TN 8410 92-165 (1992).

[25] 山形順二 他：同、PNC TN 8410 92-169 (1992).

[26] 藤田朝雄 他：同、PNC TN 8410 92-170 (1992).

[27] Sato, H. et al.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 353, 269 (1995).

[28] Sasaki, Y. et al.: *ibid.*, 353, 337 (1995).

[29] Chapman, N.A. and McEwen, T.J.: Paleohydrogeological Methods and Their Application, OECD/NEA, 23 (1993).

[30] Sanford, A.F.: Fluid-Mineral Interactions (Spencer et al. ed.) Special Publication No. 2, Geochem. Soc., 285-311 (1990).

[31] Come, B. and Chapman, N.A. (ed.): CEC Nucl. Sci. Tech. Report, EUR 11725 (1989).

[32] Watanabe, K.: *Proc. 1989 Joint Int. Waste Management Conf.*, 567 (1989).

[33] Watanabe, K.: *Proc. 1991 Joint Int. Waste Management Conf.*, 133 (1993).

[34] Apted, M.J. et al.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 353, 471 (1995).

[35] 渡辺邦夫 他：放射性廃棄物研究、2、3 (1996).