

# 資源の分類と水資源

慶應義塾大学教授

特定放射性廃棄物処分安全調査会委員

鹿園 直建

## 資源の分類と水資源

慶應義塾大学教授  
特定放射性廃棄物処分安全調査会委員  
鹿園 直建

処分地選定段階における環境要件、特に金属鉱物資源、水資源、これらの関連性についてまとめます。また、地下資源というのはどういうものなのか、その中でも、ここで取り上げる金属鉱物資源とはどういうものなのか、について考えます。それから、その中でも特に熱水性鉱床が我が国では問題となりますので、それについて若干述べ、それから水資源についてふれ、これらの金属資源、地下水の資源探査が処分場に与える影響の評価研究についての若干の私見を述べたいと思います。

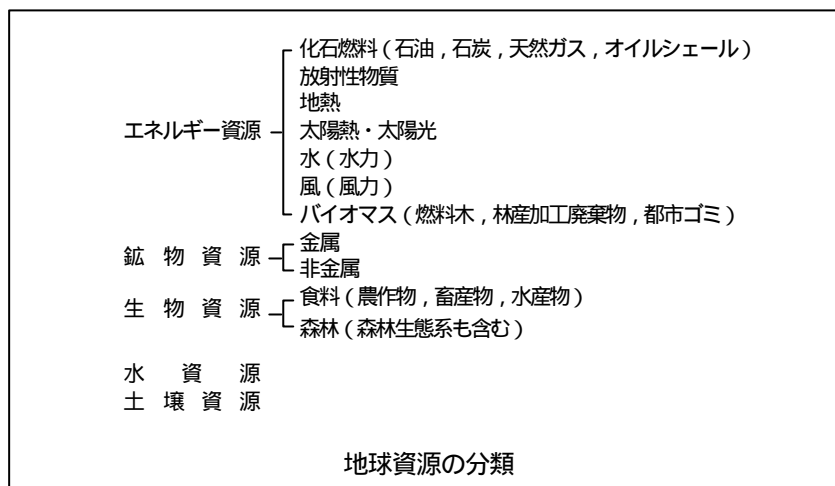
### 処分地選定段階における環境要件 - 金属資源と水資源 -

鹿園直建 (慶應義塾大学)

1. 地下資源とは  
資源の分類  
金属資源と水資源
2. 金属資源とは  
熱水性鉱床
3. 熱水性鉱床とは  
鉱脈, 黒鉱鉱床  
分布, 鉱種, 量, 耐用年数
4. 金属資源探査が処分場に与える影響
5. 水資源とは  
温泉水, 地下水
6. 地下水とは  
浅層水, 深層水
7. 地下水探査が処分場に与える影響
8. 今後の課題 - 資源探査 (金属, 地下水) が  
処分場に与える影響の評価研究  
ナチュラルアナログ研究

<図1>

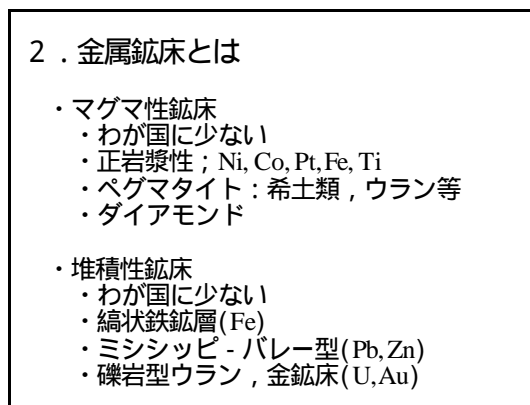
地球資源は、大きくエネルギー資源と物質資源に分かれます。物質資源の中に鉱物資源があり、これを金属鉱物資源と非金属鉱物資源に大きく分けることができます。ここでは金属鉱物資源について考えます。ほかに水資源が、放射性廃棄物の問題で重要になりますので、これについてふれます。



< 図 2 >

金物鉱物資源は有用な金属が地殻中に濃集している地質体と定義されます。その金属鉱物資源は金属鉱床から採取されます。この金属鉱床は、成因論的に分類することができます。

この鉱床タイプの例として、マグマ性鉱床、堆積性鉱床があります。しかし、これらは我が国ではあまりみられません。例えばマグマ性鉱床には、ニッケル、白金、コバルト、チタン鉱床がありますが、このような鉱床は非常にまれです。この他に希土類、ウランなどが濃集したペグマタイト鉱床も我が国では非常に少なく、現在ではほとんど海外から輸入されております。



< 図 3 >

それから、堆積性鉱床の大きいものとしては縞状鉄鉱層があり、鉄のほとんどはこの縞状鉄鉱層から掘られています。この他に鉛、亜鉛を濃集したミシシッピバレー型鉱床、ウランや金の鉱床がありますが、このようなものは日本には存在していません。

・熱水性鉱床

・わが国に多い

・黒鉱鉱床

- ・Cu, Pb, Zn, Au, Ag  
レアメタル (In, Ga, As, Bi 他)
- ・第三紀火山岩地域 (グリーンタフ)
- ・最近までわが国で清算
- ・海底で生成, 現在は地表近くに存在

・鉱脈鉱床

・浅成鉱床

- ・Cu, Pb, Zn, Au, Ag, レアメタル
- ・第三紀・第四紀火山岩地域
- ・最近までわが国で生産
- ・1kmより浅い所で生成
- ・多くが削剥
- ・地表近くに鉱徴 (変質帯等)

・浅成鉱床

- ・第四紀火山岩地域
- ・地熱地域と一致
- ・活断層分布に近い  
例・伊豆半島

・黒鉱鉱床

- ・第三紀海底火山岩地域 (グリーンタフ地域)
- ・活断層分布に近い  
例・東北地方
- ・最近までわが国で生産
- ・海底で生成, 現在は地表近くに存在

< 図 4 >

我が国は火山国であり、この火成作用により生成した熱水性鉱床が非常に多く分布しています。この代表的なものとしては黒鉱鉱床と鉱脈鉱床というのがあります。これらの鉱床にはいろいろな金属が濃集しています。例えば、銅、鉛、亜鉛、金、銀、副産物としてインジウム、ガリウム、ヒ素、ビスマスなどレアメタルと言われているものが濃集しています。

黒鉱鉱床は、第三紀の火山岩地域のグリーンタフ地域に分布しています。現在は採掘されていませんが、最近まで我が国で鉱山として稼働していました。実際には第三紀という時代の海底でできたものであり、現在それが陸化して地表近くに存在しているものです。

鉱脈鉱床は浅成鉱床と深成鉱床と2つに分類されます。浅いところでできた浅成鉱床には、黒鉱鉱床と同じようにいろいろな金属が濃集しています。これは第三紀・第四紀火山岩地域に多く分布しており、最近まで我が国ではこれらの鉱床から多くの金属が生産されてきました。現在でも稼働されている鉱山が2～3あります。一般的には地表より1kmより浅いところで生成したものであります。したがって、多くのものは削剥されて、地表近くに熱水が上がってきて岩石と反応し、地表近くが変質します。この変質帯を見つけることにより、地表からも鉱床が地下にあることがある程度推測できます。

- ・ 深成鉱床
  - ・ Sn, W, Mo, Cu, Fe
  - ・ 白亜紀花崗岩地域
  - ・ 1km より深いところで生成
  - ・ 古い時代（白亜紀）にできたので、削剥され浅いところに存在
  - ・ Sn, W, Mo, Fe は、外国の資源が圧倒的に多く全てを輸入

わが国で問題となるのは、  
黒鉱鉱床、鉱脈鉱床（浅成鉱床）

< 図 5 >

この他は白亜紀の花崗岩類という岩石に伴われる深成鉱床があります。これにはスズ、タングステン、モリブデン、銅、鉄というメタルが濃集しています。一般的には1 km より深いところでできたと推定されています。ただし、生成の時代は白亜紀という古い時代です。したがって、地表が削剥されて現在ではある程度浅いところに存在しています。現在ではこれらの鉱床に濃集しているスズ、タングステン、モリブデン、鉄のほとんどが外国から輸入されています。

したがって、主に問題となるのは熱水性鉱床であり、その中でも黒鉱鉱床、鉱脈鉱床、特に浅成鉱床が我が国では問題になります。しかし、このことは長期間で考えるとはっきりしたことは言えないのですが、現在ではこのように考えることができます。

金の鉱脈鉱床は、現在採掘の対象になっています。現在、日本では地熱開発が盛んですが、地熱発電所の分布とこの金鉱床の分布は比較的近いと言えます。例えば、これらは九州、東北地方、北海道に分布しています。火山帯の近くに地熱エネルギーが存在し、金の鉱床も存在しているといえます。

九州、東北地方、伊豆半島、北海道に金の大きな鉱脈鉱床がありますが、100 万年前ぐらいから中期中新世ぐらいに生成されました。現在稼働されている九州の菱刈鉱山の金の鉱床は今から100 万年前ぐらいに熱水からできたものであります。

菱刈鉱床の鉱脈は、地表から比較的浅いところに存在しています。他の鉱床の鉱脈も、一般的には数百 m の深さからせいぜい1 km より浅いところにみられます。地表近くにも鉱脈が見られる場合もあり、地表近くの岩石が熱水によって変質しているという状況があり、地表を調べることで地下に鉱脈が存在することが類推できます。

黒鉱鉱床は第三紀の海底の火山活動に伴ってできた鉱床であり、主に東北地方のグリーンタフ地域に分布が限られています。現在、火山の分布と黒鉱鉱床、金の鉱脈鉱床の分布は、大きくみれば一致しています。ただし、黒鉱鉱床は東北地方のグリーンタフ地域に分布し、現在の火山地域とは若干ずれが見られています。金の鉱脈鉱床は九州とか伊豆半島に多く、現在の火山分布と大まかに一致しているといえます。したがって、処分場の場所として火山地域を避けるということであるならば、鉱脈鉱床については必然的に避けられると考えられます。グリーンタフ地域は、処分地として避けられない地域も出てくるかもしれません。

今のは火山岩地域の分布との比較ですが、活断層と鉱床との比較をすると、大雑把には一致していますが、活断層は東北あたりには割合多く、北海道にも若干あるので、鉱床の分布地域とは少しずれています。

もう少し詳しくある地域で鉱床と活断層分布の比較をします。例えば伊豆半島の活断層は、東西系が東の方で多く、西の方では南北系のものが多くあります。こういう方向性からいきますと、伊豆半島には多くの鉱脈鉱床、温泉が分布していますが、大きくは鉱脈の方向、温泉の

分布は活断層の分布と近いといえます。しかし、分布は少しずれています。例えば、丹那断層近くには鉱脈鉱床がなく、分布のずれが見られています。

次に、我が国の資源量という観点から考えていきます。少しデータが古いのですが、1980年の時点での我が国のメタルの自給率を見えます。例えば銅、鉛、亜鉛、金、銀などは、熱水性鉱床からの生産が高く比較的自給率が大きいのですが、ほかのものに関しては我が国からはほとんど産出されていません。ただし、タングステンは昔は自給率が比較的高かったのですが、現在ではタングステンの鉱山はなく、生産量は0です。

ところが、埋蔵量という観点から、世界のいろいろな国のいろいろなメタルの埋蔵量を見ますと、タングステンにしてもほとんどは中国と旧ソ連、亜鉛、銅、銀という日本に多い熱水性鉱床からの生産が多いメタルに関しても、ほかの国の埋蔵量が圧倒的に多く、金属資源の分布は場所が非常に限られているといえます。

こういう金属資源の生産量は時代的に増えていますが、1980年ぐらいからは若干横ばいになってきています。ただし、生産量そのものはそれほど変化していません。リサイクルがかなり進められている金属もありますが、生産はされてきています。その生産は大きな鉱床がある国からのものが世界的には多く、我が国はそういうところから輸入しており、将来的に我が国の鉱業がどうなるかはわかりませんが、今のところは我が国で新しい鉱床を見つけて、多くを生産してはいいないということです。

それから、金属資源の耐用年数というのがあります。埋蔵量はある程度わかり、生産量もわかっているのので、現時点で埋蔵量を生産量で割ればその資源がどれだけもつのかという耐用年数が求められます。そうしますと、我が国で問題となってくる熱水性鉱床から多く出てきている金属、すなわち銅、金、鉛、水銀、銀、亜鉛という金属の耐用年数は非常に短いといえます。したがって、このような金属は資源の枯渇があるのではないかということで心配されていますが、耐用年数というのはその年々によって求められ変化するものであります。

銅の耐用年数の時間的な変化や亜鉛の変化からは、その耐用年数というのはそれほどは変わらないということが言えます。資源は使うと消費されますが、新しい鉱床が見つければ、耐用年数はあまり変わりません。しかし、今、問題にしている金属の耐用年数は20年 - 30年と非常に短く、この状況が数百年以上も続くとは思えません。リサイクルが進み、将来的には他のものを使う形になっていくと一般的には考えられています。

#### 4. 金属資源探査が処分場に与える影響

- ・ 分布  
わが国で問題となる熱水性鉱床は、現在の火山地域とほぼ一致するが、一致しない地域もある（例：グリーンタフ）
- ・ 時間枠  
わが国で問題となる金属元素（Au, Ag 等）の耐用年数からいって、数百年先までを考えればよく、一万年～十万年といった長期を考える必要はない

<図6>

### 鉱業法で定義されている鉱物（元素）

Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Bi, Sn, Sb, Hg, Fe, FeS<sub>2</sub>,  
Cr, Mn, W, Mo, As, Ni, Co, U, Th, R, その他

- ・この中で, Au, Ag, Cu, Pb, Zn が問題となる
- ・Sn, Cr, W, Mo, Ni, Co, U, Th に関しては, わが国の資源量は非常に乏しい
- ・Bi, Sb, As, Ni, Ga, In 等は, 熱水性鉱床の副産物
- ・Fe, Mn は, 豊富元素で, 海外からの輸入量が圧倒的に多い

< 図 7 >

鉱業法で定義されている鉱物では、様々な金属元素が問題になりますが、特にここでは金、銀、銅、鉛、亜鉛という熱水性鉱床に多く濃集しているものを取り上げました。ところが、ほかのスズ、クロム、タングステン、モリブデンといったものは、我が国では存在はしていますが、量的に非常に少ないので、海外からの輸入が現在はほとんどであります。

そのほかにもいろいろな金属が熱水性鉱床に濃集しています。ビスマス、アンチモン、ヒ素、ニッケル、ガリウム、インジウムなどが存在はしていますが、それらを主として採掘するということはなく、銅、鉛、亜鉛などの副産物として生産されています。鉄、マンガンは地殻中に比較的多いものであり、海外からの輸入量が圧倒的に多いものであります。

以上をまとめると、我が国で問題となるような熱水性鉱床の分布は大雑把には現在の火山地域と大体一致しているといえます。活断層の分布とも大きく見れば一致しますが、かなりずれるところもあります。いわゆるグリーンタフ地域では、第三紀の火山地域で、分布は少しずれています。

時間枠については、我が国で問題としている金属元素、すなわち金、銀というものの耐用年数は短いもので、少なくとも数百年先ぐらまでを考えておけばいいといえます。1万年 - 10万年といった長期的先まで考える必要はないといえます。

### 5. 水資源とは何か

海洋水

陸水

- 表層水（河川水, 湖沼水）
- 地下水
  - 浅層水（～100m 以浅）
  - 地下水（～500m 以深）

熱水, 地熱水, 温泉水(高温) : 火山から 20km 位まで分布

< 図 8 >

次に、水資源と環境要件との関連性について考えます。地球上にはいろいろな水があります。海洋水と陸水があり、陸水は表層水、地下水などがあります。特に地下水の浅層水、深層水が問題になります。

そのほかにも熱水、地熱水、温泉水というものもありますが、これについては火山から 20km

ぐらいまでに分布しているものであり、火山の地域を避けるということであればこういう水は問題にならないかもしれませんが。しかし、今の温泉水の定義からいくと、温泉水は必ずしも高温である必要はなく、ある溶存成分の濃度が高ければ温泉水になります。このような温泉水の開発が現在盛んになされています。このような深層の温泉水、深層水というのは問題になるかもしれません。

地下水の特徴	
浅層水	<ul style="list-style-type: none"><li>・流動速度：大</li><li>・水質：酸化的，弱酸性 - 中世 溶存成分濃度小 非平衡</li><li>・利用：生活用水，農業用水，工業用水</li><li>・放射性核種移行速度：大</li><li>・処分後しばらくしてから処分場に影響</li></ul>
深層水	<ul style="list-style-type: none"><li>・流動速度：小</li><li>・水質：還元的，中性 - アルカリ性 溶存成分濃度大 海水，火山ガスの混入 平衡に近い</li><li>・利用：温泉</li><li>・放射性核種移行速度：小</li><li>・処分時 - 1 万年で処分場に影響</li></ul>

< 図 9 >

地下水、いわゆる浅層水や深層水が問題になりますが、それぞれの特徴に違いがあります。流動速度、水質、利用面、特に放射性核種移行速度が問題になります。この他に時間枠の問題が重要です。浅層水がいつ問題になってくるのかが問題です。深層水に関しては長期的には問題になるかもしれません。それから、利用面といったことも考えなければいけません。浅層水は一般的に生活用水、農業用水、工業用水としてかなり利用されており、深層水はまだそれほどいろいろな形では利用されていません。例えば温泉として利用することが多いのですが、今後日本の水資源が少なくなってくるならば、こういう深層水も利用するようになるかもしれません。

次に、このような金属鉱床や地下水の資源の探査が問題になりますが、ここでは長期的なことが問題となります。現時点では経済性の問題があり、直接は金属鉱床の探査というものはそれほど問題にならないかもしれませんが、より長期的には問題になってくるのではないかと考え、資源探査が処分場にどのような影響を与えるのかという評価に関する研究も進めておく必要があるのではないかと考えられます。

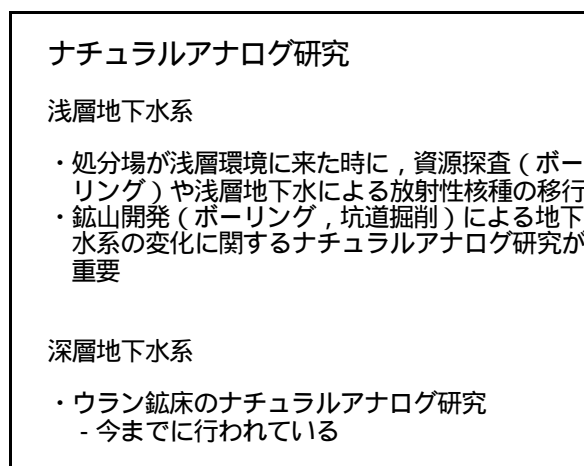
方法論としては、性能評価研究、ナチュラルアナログ研究が必要と考えられます。そして、時間的なことも考える必要があります。例えば金属鉱物資源では、短期的には耐用年数から考えると問題になりますので、短期的な時点ではこのような研究も必要だと思われ、1 万年 - 10 万年という非常に長い期間後の段階で我が国で金属鉱物資源の探査がなされるかどうかといったことは疑問があるといえます。

水資源では、浅いところの水資源と深いところの水資源が問題になりますが、浅いところは短期的に見れば地下の深いところに、300 メートルよりも深いところに埋めるということですので、それほど問題にならないかもしれません。これも本当のところは疑問符がつきます。浅

い地下水を汲み上げると深いところに対して影響を与えるかもしれません。また、深いところの地下水が放射性核種を移行するといったことが問題になりますので、もし深層水を開発しようということになりますと、問題が生じることがあると思います。

以上の観点から評価する必要がありますが、性能評価研究やナチュラルアナログ研究により評価されます。しかし、このような観点からの研究は今のところあまりなされていないので、このような研究が必要と思われます。

もう少し長期的なことを考えてみると、処分場が浅層環境に来たときに、資源探査を行って、浅層地下水が変化して、放射性核種が移行される場合があると思われます。しかし、このような状況に関するナチュラルアナログ研究は現在なされていません。この他に鉱山開発による地下水系の変化に関するナチュラルアナログ研究というものも、現在の段階でも進めることは可能です。



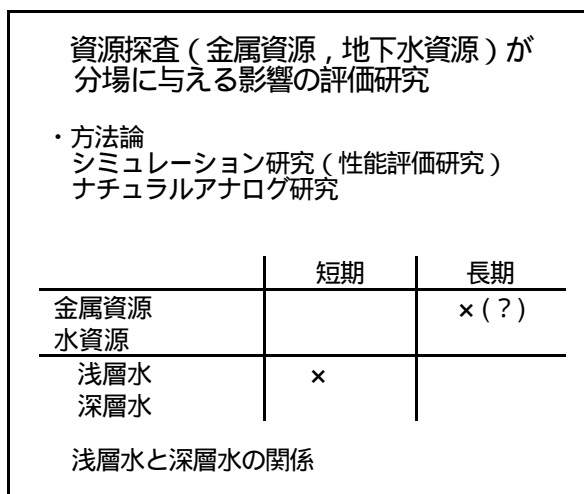
<図10>

深層地下水系での地下水の流れの長期的な問題に関しては、ウラン鉱床の深いところでのナチュラルアナログ研究というのは、今まで幾つかなされているということであります。

以上、今後の課題を考えてみましたが、例えば考慮すべき資源としては、金属資源、水資源以外にどういうものがあるのかが問題になるでしょう。例えば未知資源、未利用資源というものも今後考えていかなければいけないだろうと思われます。

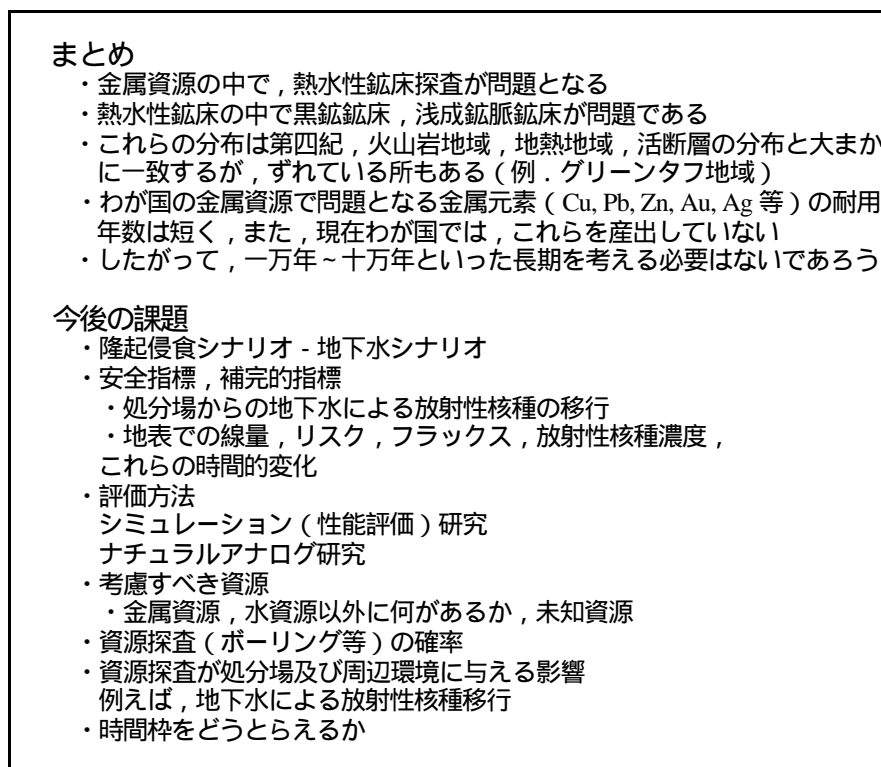
今までに水資源、金属鉱床に関しても、非常に多くの数のボーリングがなされていますので、どのぐらいの確率があるのかといった観点は、今までのデータだけでもある程度言えると思われます。このようなことは今でも調査が進められると思います。

資源探査が処分場及び周辺環境に与える影響といった問題が重要と思われます。この他に時間枠をどの程度考えていくのかということも大きな問題です。もしも長期的に考える必要があるならば、特に隆起・侵食シナリオによって、深いところの処分場が浅いところに来て、浅層地下水によって影響を受けますので、このような現象に関してはきちんと調べておく必要があると思います。



<図11>

安全指標とか補完的指標をどのように考えるかという問題は、今まで非常に多くの議論があります。地表での線量、リスク、フラックス、放射性核種濃度というものの時間的な変化、そういうものに対する資源探査がどのように影響するのかということ、短期間で考えることももちろん重要ですが、長期間に関する影響も今後審議していく必要があると思います。このような評価をシミュレーション、ナチュラルアナログ研究など様々な観点から考える必要があると思います。



<図12>

## 【質疑応答】

質疑応答については、既に公開している「速記録」を元に作成しております。

### 質問者

レアメタルみたいなものが急に用途が出てきて開発されるという可能性はないでしょうか。それから、逆に希土類みたいなものがナチュラルアナログとして有効なのではないかと思えますけれども、お考えをお聞かせください。

### 鹿園調査会委員

レアメタルが今後いろいろと利用され、どのように利用されていくのかというのはなかなか難しい問題だと思います。ただ、今のところはレアメタルに関しては、レアメタル単体の鉱物での鉱床は我が国では非常に少ないと思われれます。今のところはほとんどを輸入しているわけでありますけれども、レアメタルだったら量的に少なくとも問題になると思います。それほど量は必要ないということです。小規模であってもそういう鉱床となり得るかもしれません。

それから、先ほど言ったようにレアメタルの場合は、今のところはガリウムやインジウムなどで、インジウムについては日本が世界で一番産出しています。よく知られていないことなのですが、銅とか鉛とか亜鉛とかの鉱床から副産物としてとられているものが多いということです。主要な鉱床があまり問題とならなければ、それほど問題にならないということも考えられるのではないかと思います。

それから、希土類はナチュラルアナログとして使えないかということです。そういうものはナチュラルアナログとしての元素の挙動に関する研究は非常に重要です。例えばレアアースですと、アメリカウムというものと非常に性質が近いものですから、アメリカウムの挙動を知る上では希土類元素の長期的な、例えば地下水とか水によって運搬されることに関する研究は重要ではないかと考えております。