

資源をつくる水のちから

—その2 燃料資源・地熱資源—

佐脇 貴幸¹⁾

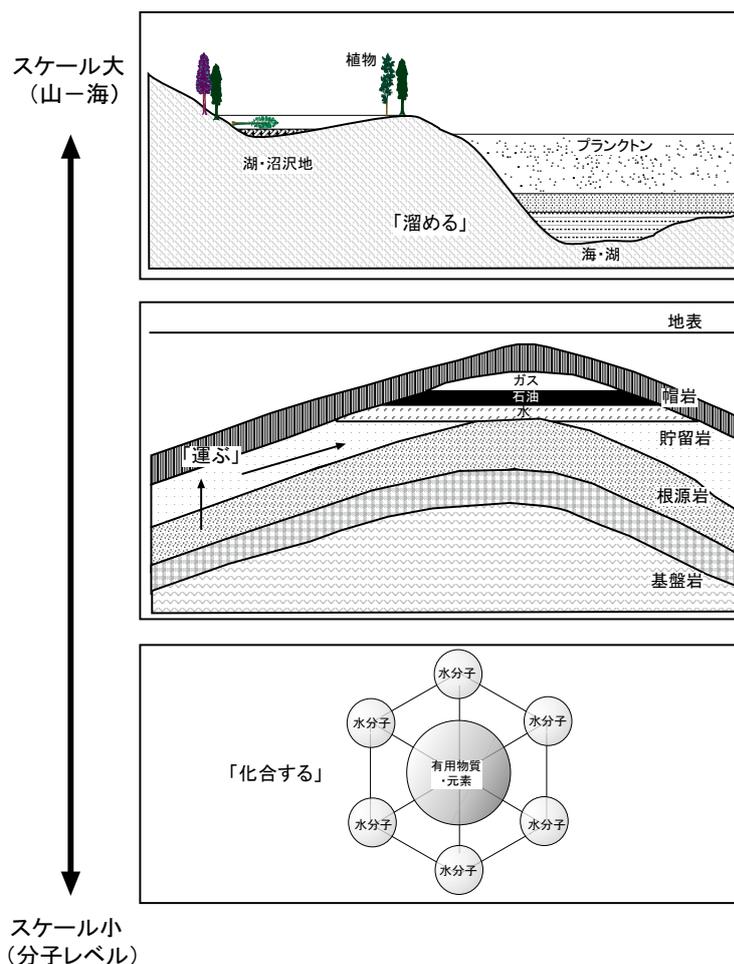
1. はじめに

産業技術総合研究所(産総研)の地質標本館には、様々な岩石・鉱物・化石標本が展示されています。佐脇(2021)では、これらの展示標本の内の鉱物資源に関わるものを基に、鉱物資源をつくる「水のちから(機能, 能力)」を解説しましたが、小論ではその続編として、同じく展示標本・展示物を使い、燃料資源, 地熱資源をつくる「水のちから」に関して解説します。今回関係する「水のちから」は、「溜める」, 「運ぶ」, 「化合する」(第1図), 「熱を持つ」です。

2. 燃料資源をつくる「水のちから」

2.1 鉱床の分類

燃料資源の鉱床の代表的なものは、石油, 石炭, 天然ガスの鉱床です。これらは、どれも生物の遺骸(化石)に関連しているため、化石燃料(fossil fuel), 有機燃料(organic fuel)と呼ばれることもあります。さらにこれらは、物性, 化学組成, 原材料物質などに基づいて細分されます(第1表)。ただし、第1表の分類は人為的なものであって、実際には石油—天然ガス—石炭の間の中間的な性質を持つものも存在します(氏家, 1990)。



第1図 燃料資源に関係する様々な「水のちから」

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報基盤センター

キーワード：水, 燃料資源, 地熱資源, 地質標本館, 展示

第1表 化石燃料の分類（氏家，1990）
 なお，不燃性天然ガスは，正式には化石燃料に含まれない。

| | 気体 | 油田ガス | 乾性ガス |
|------|----------|-------------------------|---------|
| | | | 湿性ガス |
| 石油 | 液体 | 原油 | |
| | 半固体 | アスファルト | |
| | 固体 | アスファルト鉱、パラフィンワックスなど | |
| | | | |
| 天然ガス | 可燃性 | C, Hを主にするもの | 炭田ガス |
| | | H ₂ Sを主にするもの | 水溶性天然ガス |
| | 不燃性 | N ₂ を主にするもの | |
| | | CO ₂ を主にするもの | |
| | | H ₂ Oを主にするもの | |
| 石炭 | 腐植炭（陸植炭） | 陸上植物を原材料とするもの | |
| | 残留炭 | 樹脂、孢子、花粉などを原材料とするもの | |
| | 腐泥炭 | 水中植物を原材料とするもの | |

乾性ガス：1,000 ft³（約 28.3m³）のガスに含まれる液体成分が 0.1 ガロン（約 0.45 リットル）以下の天然ガス。
 湿性ガス：1,000 ft³ のガスに含まれる液体成分が 0.1 ガロン以上の天然ガス。

なお，ウラン，トリウムなどの放射性元素からなる核燃料物質も燃料資源（エネルギー資源）といえます（スキナー〔松尾訳〕，1971；番場，1990）が，今回は化石燃料に分類されるものに絞っての話といたします。

2.2 石油鉱床

石油や天然ガスの鉱床が形成される過程は、「生成→移動→集積」という三段階からなる「石油システム」というモデルで解釈されています。その中の重要な地質学的要素としては，堆積盆地（堆積盆），石油根源岩，貯留岩（貯留層），トラップなどがあります（森田・鈴木，2006；佐脇，2021，第1表）。それぞれ簡単に説明すると，堆積盆地（堆積盆）とは，多量の堆積物が溜まる盆地状の地形（場）のことです。石油根源岩とは，有機物を多量に含む堆積岩のことです，例えば珪質泥岩（森田・兼子，2020）があります。貯留岩とは，隙間が多く（多孔質），石油を内部に溜める能力を持った岩石のことです。貯留岩の岩種としては砂岩，炭酸塩岩などがありますが，東北地方日本海沿岸地域では火山砕屑岩も貯留岩として重要です（氏家，1990）。トラップとは，貯留岩から石油が逃げ出せない（逸失しない）ように閉じ込める地質構造のことです。例えば，地層が褶曲して背斜構造をなし，帽岩と呼ばれる浸透率の低い岩石が，ドームの屋根のように貯留岩の上を覆っている背斜構造が代表的なもので（第1図中段），そのほかに断層によるもの，不整合によるものなどがあります（木下，1973）。石油鉱床は，このような「原料」，「入れ物」としての地質学的要素があつて

つくられるわけですが，「原料をつくり入れ物に入れる」（＝石油システム）ためには，「水のちから」が必要です。それは，石油の原料を「溜め」，できた石油を「運ぶ」という「ちから」です（第1図上段，中段）。

石油の起源物質は有機物の集合体，具体的には植物プランクトンや植物片などの生物の遺骸だと考えられています。すなわち，海中に発生したプランクトンや陸から運ばれてきた生物の遺骸が水中で沈下し，水底（海底，湖底などの堆積盆地）に大量に溜まり，有機物を多量に含んだ堆積物が形成されることが石油の生成の始まりと考えられます。第2図Aは，地質標本館2階第2展示室に示してある石油・天然ガス・石炭の形成過程を簡潔に示した説明図ですが，図右において，海中に発生した植物プランクトンが死んで海中を沈下し，酸素が乏しい条件下（嫌気的環境といえます）で海底に溜まっていく様子を示しています。すなわち，水は，石油の「原料」となる多量の有機物を堆積盆地内に「溜める」働きをしていることとなります。

この堆積物が続成作用によって固結して堆積岩になったものが石油根源岩です。その例として，地質標本館には，先述の珪質泥岩が展示されています（第2図B左；森田・兼子，2020）。これに含まれているのが元の有機物から変化して形成されたケロジェン（第2図B右；森田・谷田部，2021）です。このケロジェンを含む石油根源岩が地中で熱を受け続けることによって，次第に石油が生成しやすい状態に近づいていきます。この過程を熟成，またその程度を熟成度といい，この熟成度が上がっていくとケロジェンが



第2図 A: 石油・天然ガス・石炭の形成過程の模式図, B: 珪質泥岩(左)とケロジェン(右)の標本, C: 秋田県申川油田の貯留岩(全て2階第2展示室)

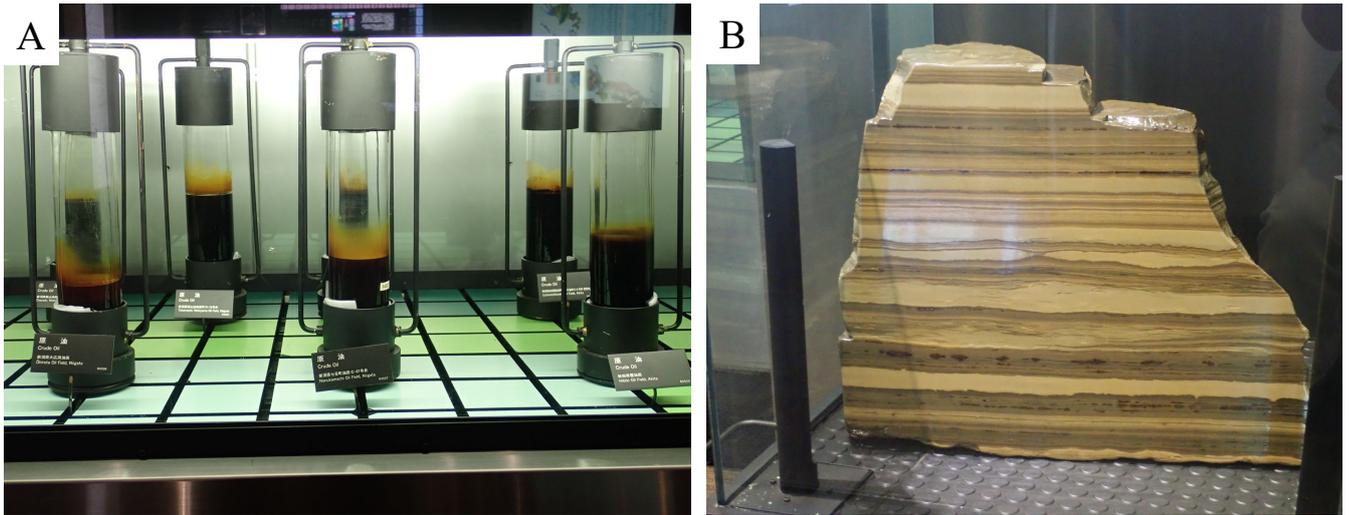
分解し始め、石油の生成につながっていきます(ただし、地温が上がりすぎると、石油を通り越してガス化してしまいます)。これが石油システムでの「生成」の過程です。このように、生物の遺骸から石油が形成されるという考え方のことを「有機成因説」といいます。なお、生物の遺骸に依存しないとする「無機起源説」もあります(中島, 2015)。

さて、上記の過程で形成された石油分は、石油根源岩から貯留岩(第2図C)内に移動します。これを第一次移動といいます(第1図中段)。第一次移動においては、水が媒体として働く、水以外の媒体(岩石中の割れ目、ガスなど)が利用されるなどの説があります(氏家, 1990)。それに続いて、石油が貯留岩内を上方へ移動していき、トラップまで移動することを第二次移動といいます(第1図中段)。第二次移動は、基本的には水と石油との間の密度差による浮力がその原動力となりますが、時には水圧の高い方から低い方へと動く流れ(水力流)も関与します(相場, 1979; 氏家, 1990; 田口, 1998)。このように、石油の移動・集積過程では、直接的もしくは間接的に水の「運ぶちから」が関

与することになります。

トラップ内では、模式的には下位から水相(油田水)、石油相、ガス相という順に重なります。しかし、実際にはプールのような広々とした開放空間に集積しているわけではなく、貯留岩の隙間に押し込まれたように集積しています。このため、3つの相の間がスパッと明確に区切られているわけではなく、漸移的な部分もあります(手塚, 1990)。このトラップに十分な石油が集積すれば石油鉱床と呼ばれることになります。

第3図Aには、新潟県、秋田県の石油鉱床から採取された石油(原油)標本を示します。日本の産油地域(過去に石油を産した地域)は、北海道道央から新潟県にかけての日本海側及び静岡県ですが、比較的大規模な石油鉱床は秋田県、新潟県に集中しています(氏家, 1990)。秋田県から新潟県にかけて比較的大規模な石油鉱床が多いのは、日本海の形成と関係があると考えられています。すなわち、新第三紀中新世にユーラシア大陸の縁が割れ始めることで海(古日本海)が形成され始めました(およそ2,000万年前～



第3図 A：秋田県，新潟県産の石油の標本，B：アメリカの始新世の湖成層から採取されたオイルシェール（ともに2階第2展示室）

1,500 万年前：高橋，2017）。この時，古日本海の東部分で陥没が起きて地溝帯（＝堆積盆地）が形成され，そこに有機物を多く含む堆積物，砂質の堆積物あるいは火山砕屑岩などが溜まることで，石油根源岩と貯留岩の元が形成され，これが時を経て石油鉱床を形成していったと考えられています（島津，2000）。世界的にみると，大規模な石油鉱床（大規模な油田）は中東，メキシコ湾岸などに存在します（氏家，1990）が，これらは特に大規模な堆積の場（堆積盆地），多量の有機物の集積，熟成，トラップ内への石油の保存，地質構造の非破壊などの条件が全てそろったところだと言えます。

一方，第3図Bはオイルシェールの標本です。オイルシェールとは，ケロジェンを大量に含む緻密な堆積岩のことで，油母頁岩^{ゆぼけつがん}，油頁岩と呼ばれることもあります（手塚，1990）。これがさらに熟成が進むと，中に石油分やガス分を含むようになります。1990年代以前は，この地下深くにある岩石から石油分を取り出すことは困難と考えられていましたが，1990年代の回収技術の進展，2000年代の石油高価格時代を背景にして，2006年以降は，「シェール革命」と呼ばれる，シェールオイル・シェールガスの爆発的な生産が始まりました（熊坂，2014；<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/1-1-1.html> 閲覧日：2021年7月21日）。なお，この生産においては，高圧の水を地下に押し込んで石油・ガスを絞り出すためにフラッキング（水圧破砕法）という手法が使われており，これまでとは違った意味で，人為的に「水のちから」を利用していることとなります。ただし，現在では，環境汚染を防ぐためにフラッキングを規制・禁止しようとする動きがあります（大場，2014；<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/>

05/0fe3059721f524c5.html 閲覧日：2021年7月21日）。

以上の石油をつくる「水のちから」を再度確認しますと，まず石油の起源物質である有機物を「溜める」，次に石油分ができた後には，それを移動させるための媒体として，「運ぶ」という「ちから」が関与していることとなります。

2.3 石炭鉱床

近年は，石炭を日常生活の中で使うことは極めてまれになりましたが，昭和30年代～40年代前半までは，学校や公共施設での暖房の主役（石炭ストーブ）として，冬場には当たり前のように目にしているものでした。今でも，火力発電，鉄鋼生産には欠かせないものとして使われています。一方で，石炭の燃焼はCO₂の大規模排出源であることが問題視され，地球温暖化対策の観点からその使用を大幅に削減することが，社会的課題となっています。

このように，現在は肩身の狭い立場になってしまった石炭ですが，18世紀の産業革命以降，社会を支える重要なエネルギー源として利用されてきたことは揺るぎない事実です。日本にも，釧路，石狩，常磐，宇部，筑豊などの多数の炭田が存在し（地質調査所（編），1960），日本の高度経済成長を支えてきました。ここでは，「黒いダイヤモンド」とも呼ばれた石炭のでき方と，地質標本館の展示物について紹介します。

石炭は，言ってみれば，今から数億年前～数千万年前の湿地帯に繁茂していた陸上植物の化石です。地球上に陸上植物が最初に現れたのはシルル紀（およそ4.4億年前～4.2億年前）です（赤木ほか，1984）が，陸上植物が繁茂し始めたデボン紀（およそ4.2億年前～3.6億年前）以降の様々な地質時代に石炭が形成されるようになりました。最も代表的

といえるのは、ヨーロッパやアメリカ東部に産する石炭紀（およそ 3.6 億年前～3 億年前）のもので（相原，1979）。石炭が多く形成された地質時代だから石炭紀，ということですね。一方，日本の炭田は古第三紀（およそ 6,600 万年前～2,300 万年前）の間に形成されたものが多く，この時代のものは主として北海道と九州北西部に分布しています（相原，1981；藤田ほか，2009）。

石炭の元となる植物がどのようにして集積したかに関して，従来は，湿地帯に繁茂している陸上植物が瀉，沼沢地，湖，内湾，河口の三角州などの，比較的水の流れが穏やか，あるいは滞留する場所で，微生物や水による様々な作用を受けつつも，完全に酸化分解することなく水中に堆積する，という過程が考えられていました（徳永，1967）。すなわち，植物の遺骸を「溜める」という「水のちから」が石炭の形成にとって重要となるわけです。一方，1980 年代後半以降には，湿原でミズゴケの群生による高位泥炭地あるいは高層湿原で泥炭が形成されることを始まりとする，という考えが現れました（藤田ほか，2009；日本エネルギー学会（編），2013）。ただ，いずれの説でも，植物の遺骸が空気（酸素）から遮断されることで酸化分解を免れることが重要という点は変わりません。次いで，この地表近くにあった植物の遺骸の上に砂・泥などが溜まって地中に埋もれていき，地下深く（地下数百 m～数 km）まで埋没することで地圧・地熱の影響を受け，石炭が形成されると考えられています（鈴木ほか，2008；藤田ほか，2009）。

このようにしてできた石炭は，その原植物の種類によって，腐植炭，残留炭，腐泥炭に分類されます（第 1 表）。また，その中に含まれる炭素の量によって泥炭・亜炭，褐炭，あれきせい 亞瀝青炭，瀝青炭，無煙炭に分けられます（第 2 表）が，粘結性による分類，燃焼法による分類もあります（鈴木ほか，2008）。粘結性とは，石炭を，かんりゆう 酸素を遮断して強熱し熱分解させたとき（乾留といいます），石炭が一旦軟らかくどろけてから再び固まる性質のことで，その程度の差が分類の基準となっています（藤田ほか，2009）。

第 4 図には，日本産の石炭の標本を示します。第 4 図 A は

釧路市太平洋炭礦の垂瀝青炭の標本，B はすでに閉山してしまった日本各地の炭鉱の石炭の標本です。先述の通り，かつては北海道から九州まで日本にも多数の炭鉱がありましたが，1960 年代のエネルギー革命を経てエネルギー源の主役が石炭から石油に代わり，さらに安い海外の石炭の輸入が増加すると，日本各地の炭鉱は次々と閉山しました（藤田ほか，2009）。現在唯一残っている坑内掘りの炭鉱が，太平洋炭礦を引き継いだ釧路コールマインで，そのほか，2017 年度時点では，6 カ所の露天掘りの炭鉱があります（石炭エネルギーセンター，2018）。石炭は，きらきら光る金属鉱物とは違い，見た目は黒く地味ではありますが，日本の産業を支えてきた重要な資源であることに思いを馳せて，標本をご覧いただきたいと思います。

なお，第 4 図 C には，石炭鉱床に関連あるものとして珪化木の標本を示します。珪化木とは，樹木が地中に埋もれたものの石炭にはならず，木質部に珪酸分（ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）を含む水がしみ込み，中の成分を置換してできたものです。九州の炭田では，「松岩」と呼ばれることもあります（巨理，1966）。地質標本館前に展示してある標本は三点ありますが，どれも北海道美唄炭田から採取された，約 4,000 万年前の針葉樹です（澤田，2010；辻野，2017）。

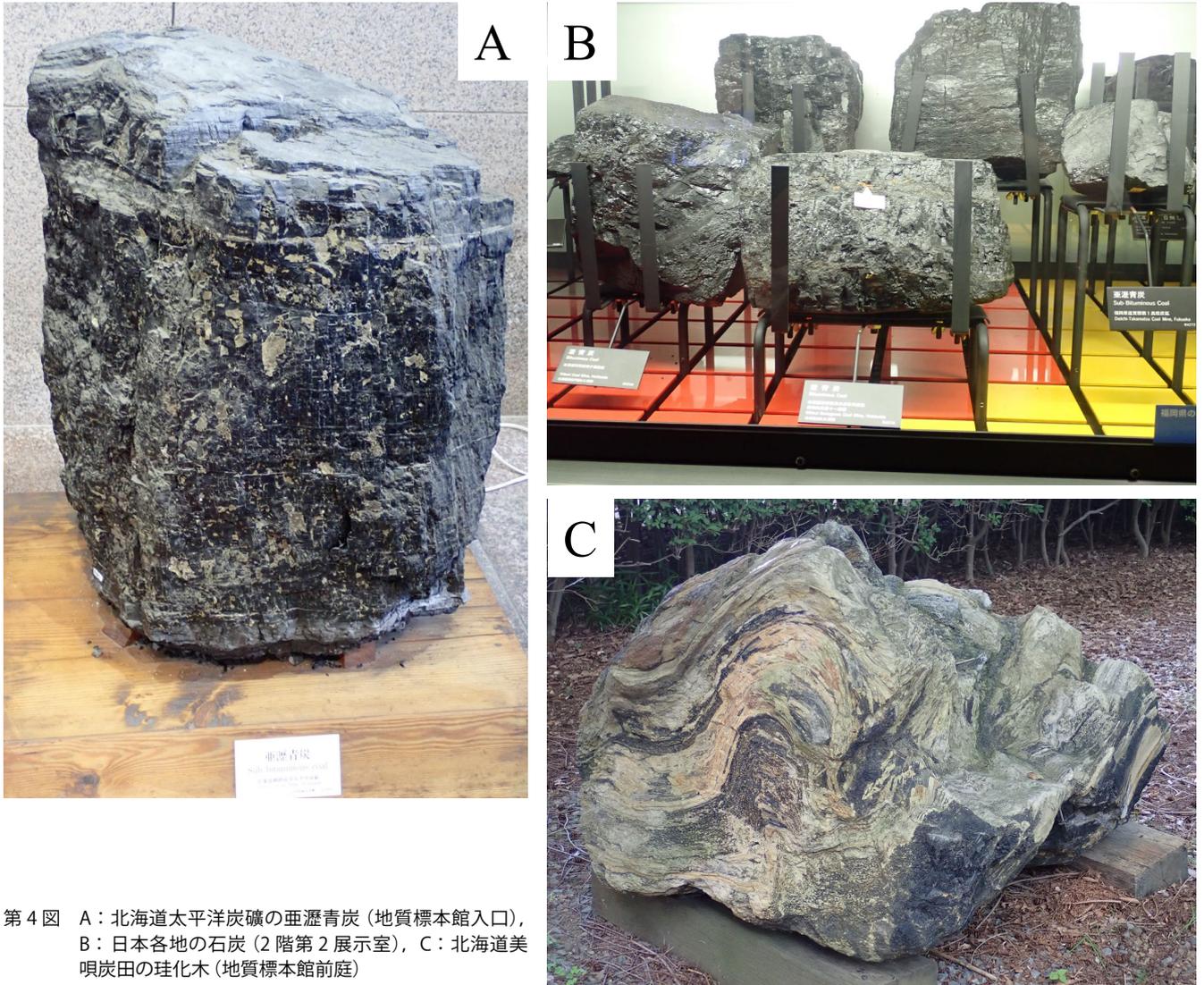
2.4 天然ガス鉱床

天然ガスには可燃性と不燃性のものがあります（第 1 表）が，燃料資源として利用されるのは，当然ながら可燃性の天然ガスです。可燃性天然ガスは，一般に油田に伴って産出しますが，その組成，成因，物性，産状・開発状況によってさらに分類されます（第 3 表）。特に，生物有機物および生物活動に由来する生物起源ガス（有機起源ガス）に関しては，その原材料は主として生物の遺骸であり，起源は石油，石炭と同根ということになります。すなわち，原材料である生物の遺骸が溜まる段階で，「水のちから」が働いたことになります。

第 3 表の中で，特に水が関与していることが明らかなのは，水溶性ガスとメタンハイドレートです。水溶性ガス

第 2 表 炭素量による石炭の分類（鈴木ほか，2008）

| 炭素(%) | 石炭化度による分類 | 粘結性による分類 | 燃焼法による分類 |
|-------|-----------|-----------|------------|
| ～70 | 泥炭(草炭)、亜炭 | - | - |
| 70～78 | 褐炭 | 非粘結炭 | - |
| 78～80 | 亞瀝青炭 | ガス用炭 | 非粘結炭、微粘結炭 |
| 80～83 | 瀝青炭 | (低度) 弱粘結炭 | ガス用炭、コークス炭 |
| 83～87 | | (中度) 粘結炭 | コークス炭 |
| 87～91 | | (高度) 強粘結炭 | コークス炭 |
| 91～ | 無煙炭 | 非粘結炭 | 無煙炭 |



第4図 A：北海道太平洋炭礦の垂瀝青炭（地質標本館入口），
B：日本各地の石炭（2階第2展示室），C：北海道美
唄炭田の珪化木（地質標本館前庭）

は、微生物が海底堆積物を分解して作り出したメタンを主成分とするもので、地下深くの地下水（^{かんすい}鹹水）に溶け込んでいます。代表的なものとしては南関東ガス田、宮崎ガス田、新潟ガス田があります（氏家，1990）。このうち、新潟ガス田は石油鉱床と近い位置関係にはありますが、成因は異なると考えられています（島津，2000）。このような水溶性天然ガス鉱床の形成には、メタンを溶け込ませるといふ「水のちから」が働いていることになります。なお、水溶性天然ガスを含む鹹水はヨウ素に富んでいるということも特徴となっています（<http://www.godoshigen.co.jp/learn/iodine/base.html> 閲覧日：2021年8月10日）。

もう一つのメタンハイドレートですが、これは現在日本で最も注目されている天然ガスです。これまで述べてきたように、石油、石炭、天然ガスは日本にも産しますが、現在その自給率は非常に低く、ほとんどを輸入に頼っています。しかし、近年の海底調査によって、日本の周辺の海底にはメタンハイドレートという新しい形の天然ガスが存在

することが明らかとなってきました。ハイドレート（ガスハイドレート）とは、^{ほうせつ}包摂（^{ほうせつ}包接）化合物（クラスレート）の一種で、結晶の内部に大きな空間があって^{かご}籠状の構造をなしており、そこにガス分子が閉じ込められているものです。様々なガスに応じたハイドレートがありますが、閉じ込められているガスがメタンの場合、これをメタンハイドレートと呼びます。低温・高圧条件下では氷のような固体物質であり、可燃性のメタンを含んでいるために「燃える氷」とも呼ばれています。化学組成は、 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ と表されます（松本ほか，1994；森田，2006）。すなわち、水の「化合する」といふ「ちから」が働くことでメタンハイドレートが形成されるわけです（第1図下段）。

ガスが水と化合して氷状の固体物質をつくることは19世紀初めから知られていましたが、あくまで実験室や工場といった、人間のコントロール下にある場合のみの存在と考えられていました。しかしながら、1930年代になると、高圧ガスを搬送するパイプラインにガスハイドレートが

第3表 可燃性天然ガスの分類

氏家 (1990), 天然ガス鉱業会 (1998), 日本エネルギー学会天然ガス部会 (編) (1999, 2008), 鈴木ほか (2008), 日本エネルギー学会天然ガス部会資源分科会 CBM・SG 研究会・GH 研究会 (2014) の内容に基づいて作成

| 分類基準 | 分類 | | 特徴等 | |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 組成による分類 | C, Hを主にするもの | | | |
| | H ₂ Sを主にするもの | | | |
| 成因による分類 | 非生物起源ガス(無機起源ガス) | | 地球創生期に地球内部に閉じ込められたもの | |
| | 生物起源ガス(有機起源ガス) | 微生物起源ガス | 微生物活動に伴って生成したもの | |
| | | 熱分解起源ガス | 有機物の熱分解によって生成したもの | |
| 物性による分類 | 乾性ガス(ドライガス) | | ほとんどメタンからなり、常温常圧下で気体状態のもの | |
| | 湿性ガス(ウェットガス) | | メタンのほかに常温常圧下で液化するペンタン、ヘキサンを含むもの | |
| 産状、開発状況による分類 | 在来型天然ガス | 油田ガス | 随伴ガス | 石油に伴って産出するもの |
| | | | 非随伴ガス(構造型ガス、遊離型ガス) | 石油をほとんど伴わずに産出するもの |
| | | 水溶性ガス | 深さ1,000mほどの地下水に溶存しているもの 日本以外では水溶性ガスを非在来型とする場合もあり | |
| | 非在来型天然ガス | シェールガス | | 石油根源岩から回収されるガス |
| | | タイトサンドガス | | 低浸透性の硬質砂岩に閉じ込められている天然ガス |
| | | コールベッドメタン(コールシームガス) | | 石炭層中のメタンガスで、産出状況により炭田ガス、石炭ガス、炭鉱ガス、炭層ガスなどと呼ばれる |
| | | メタンハイドレート(天然ガスハイドレート) | | 軽炭化水素(メタン等)と水の水和物 |
| | | 地球深層ガス | | 地球深部にあると主張されている無機起源ガス |

自然に発生することが知られ、その後 1970 年代にはシベリア、カナダ北方の凍土層内にメタンハイドレート層が存在することが発見されました。さらに、深海底の探査によって、ガスハイドレートが深海底の海底下に存在することが確認されるようになりました(松本ほか, 1994)。以上を踏まえて、日本近海の海底でのメタンハイドレート調査が行われるようになり、次々とメタンハイドレートが存在することが確認されるようになりました。日本近海のメタンハイドレートの賦存形態には、砂層型メタンハイドレート、表層型メタンハイドレートの二種類があり(https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/oil_and_gas/ 閲覧日: 2021年8月2日)、それぞれについての資源量調査、開発方法に関する調査・研究が進められています。

メタンハイドレートが安定に存在するには常時低温・高圧条件に保つ必要があるため、地質標本館内でメタンハイドレートそのものを常時展示することはできませんが、2階第2展示室にはメタンハイドレートの結晶模型(第5図A)と天然での試料の様子(第5図B)が展示されています。結晶模型では、メタン(白い球)を、水分子(黒い小さい球)が籠かごのように取り囲んでいることでメタンハイドレートが

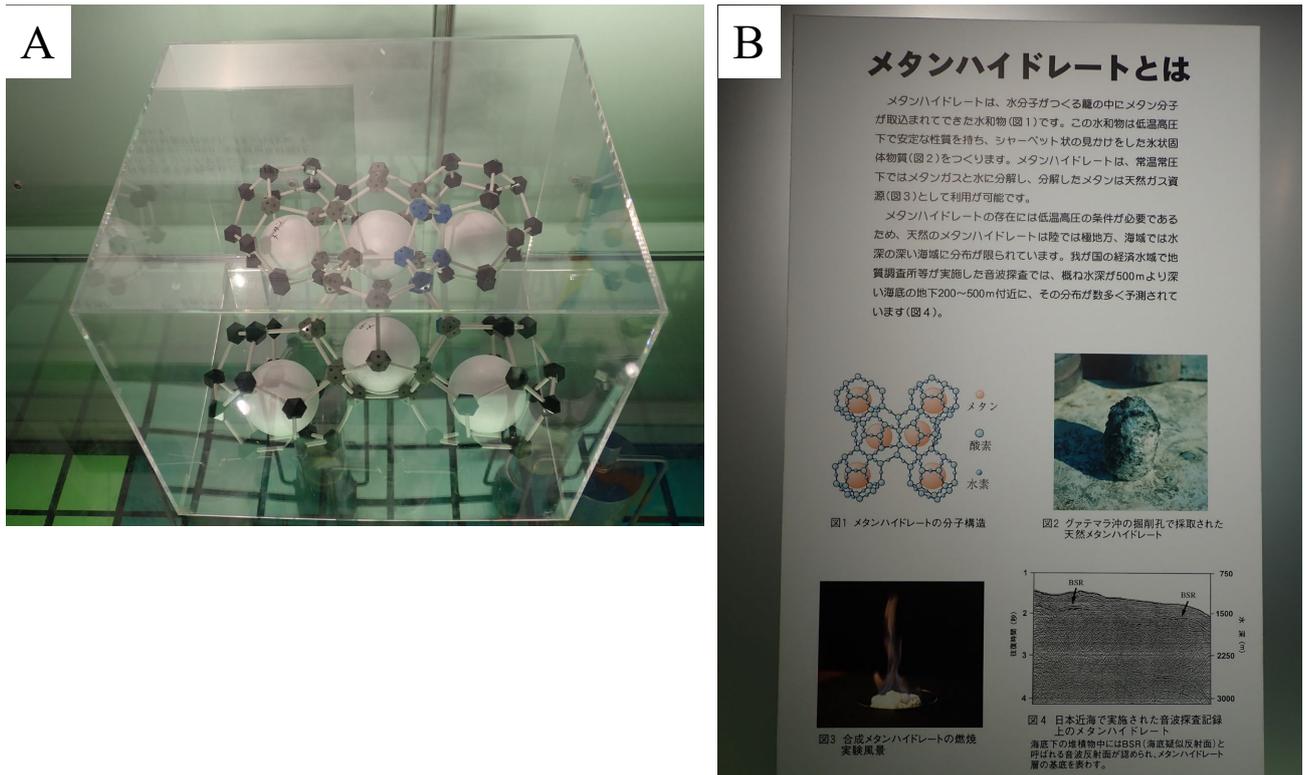
形成されることを示しています。もし中に入っているメタンが抜けてしまうと、この籠状の構造(包摂化合物)そのものが崩壊してしまいます(松本ほか, 1994)。

メタンハイドレートに関する解説については、例えば産総研の「サイエンスタウン」(https://www.aist.go.jp/science_town/reading/15/ 閲覧日: 2021年8月2日)、MH21-S 研究開発コンソーシアムの解説ページ(<https://www.mh21japan.gr.jp/search.html> 閲覧日: 2021年8月2日)なども併せてご覧ください。

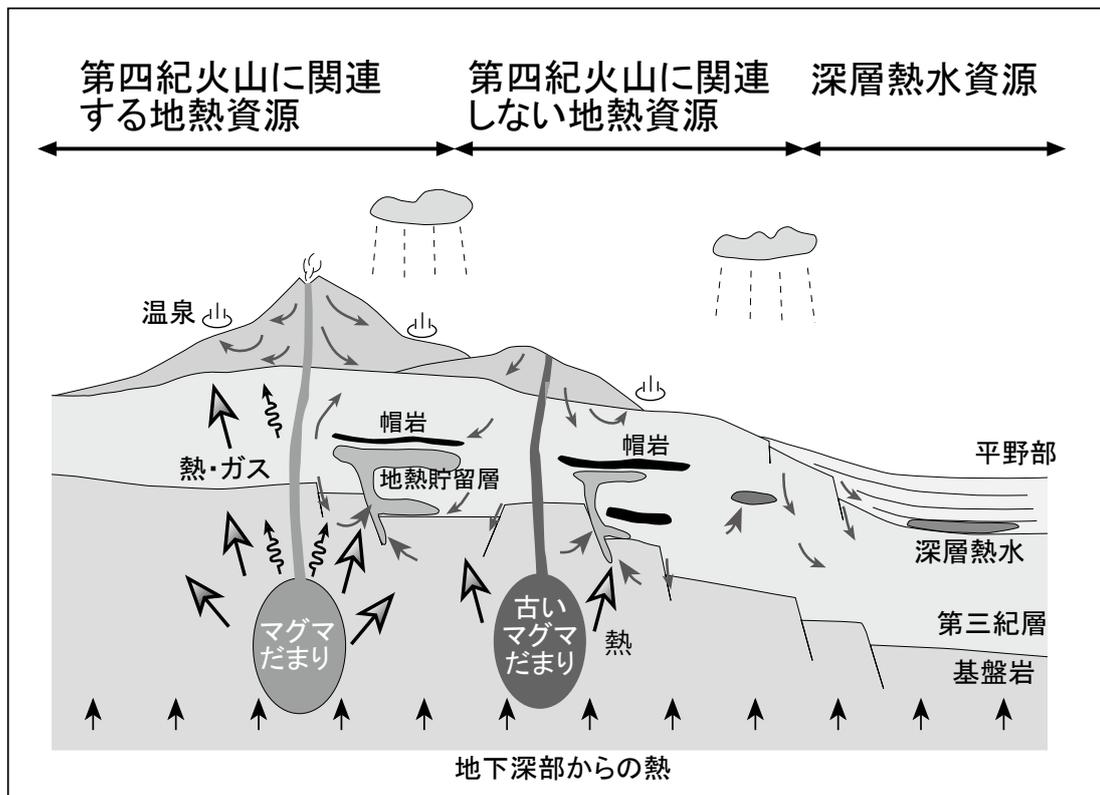
3. 地熱資源をつくる「水のちから」

地熱資源は、端的に言えば水の持つ熱エネルギー、即ち「熱を持つ」という「水のちから」によるものです。地層中の割れ目を通じて地表から浸み込んだ天水は、火山の下にあるマグマ溜まりあるいは地球内部から伝わってくる熱で熱せられ熱水となります。このような熱水が地下の割れ目に溜まっているところを「地熱貯留層」(佐脇, 2021, 第1表)と呼びます。地熱資源とは、このような熱エネルギーを蓄えた熱水のことを指します(第6図)。

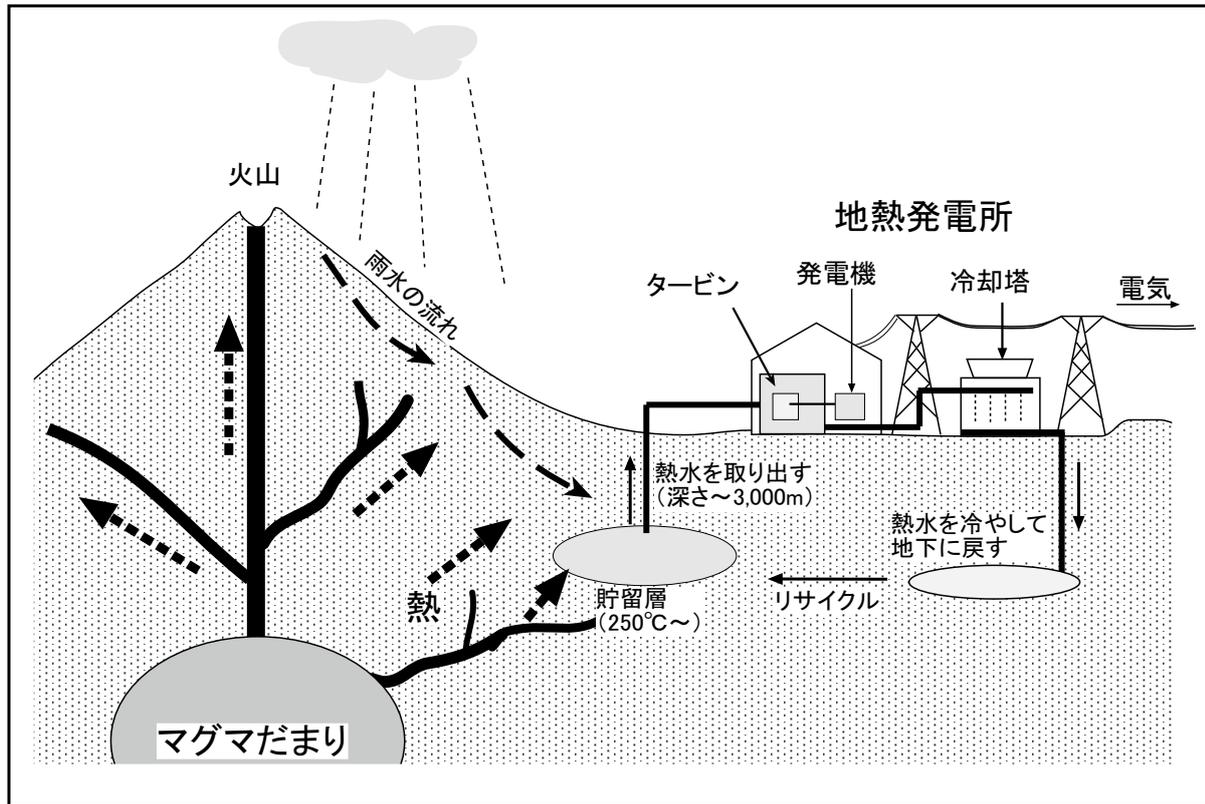
第6図に示したように、地熱資源には、火山に關係す



第5図 A：メタンハイドレートの立体模型，B：メタンハイドレートの産状，特徴などの説明パネル(ともに2階第2展示室)



第6図 地熱系の概念図(佐脇・水垣, 2005; 水垣ほか, 2007)



第7図 地熱発電の概念図(佐脇ほか, 2001)

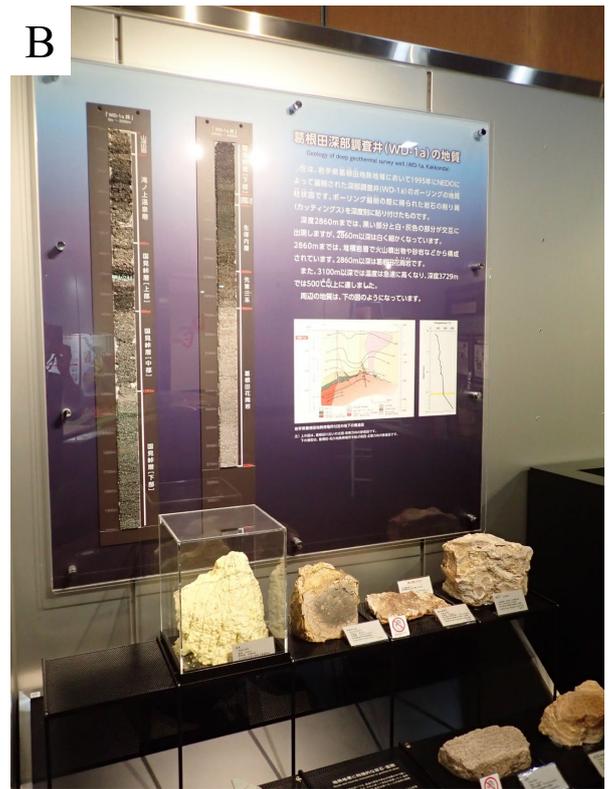
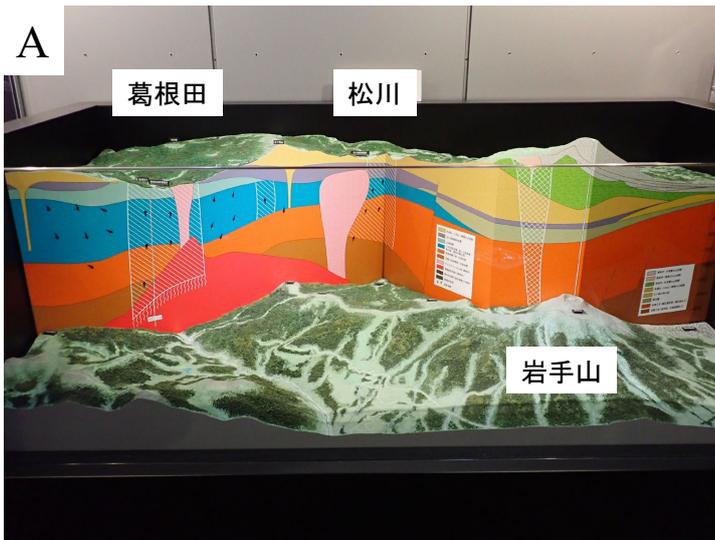
るものとそうでないものがあります。火山の近くが熱いのは、すぐ近くにマグマだまりがあって、その熱で熱せられるために温度が高くなっているわけですが、火山から遠く離れた場所でも地下は深いところほど温度が高くなっています。これは地球の深部からじわじわと伝わってくる熱のためで、日本付近での平均的な地下の温度の上昇率(地温勾配)は約 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ です。したがって地下 $1,000\text{m}$ にある地下水の温度は、地表近くの地下水に比べて約 30°C 高くなります。近年では、都市・平野部の、火山が無いところでも温泉施設がつくられています。これは $1,000\text{m}$ 以上の深さまで穴を掘り(ボーリングといいます)、地下深くの地下水を温泉水として採取しているもので、このような温められた地下水を「深層熱水」といいます(水垣ほか, 2007)。なお、前節の水溶性天然ガスを溶存させている鹹水も、実はこの深層熱水に当たります。

そのほか、特に熱いわけではありませんが、地下 $10\sim 20\text{m}$ よりも深いところでは一年中一定の温度になっており、そこに流れている地下水と地表との温度差を利用して冷暖房に利用する技術があります。この技術は「地中熱利用」と呼ばれ、省エネルギー技術として注目されています。

このように、地熱資源となるものは、低温から高温まで様々な温度の地下水ということになりますが、そのうちの

特に高温の熱水を利用して発電する技術を、地熱発電と呼びます(第7図)。地熱発電では、地下 $500\sim 3,000\text{m}$ 程度の深さまで掘削した井戸を使って、地熱貯留層から 250°C 以上の熱水を取り出します。地下深くでは圧力が高いため液体状態ですが、地表近くになると圧力が下がることで蒸気が発生(沸騰)します。この蒸気を熱水から分離し、それを使って発電機のタービンを回して発電します。発電に使った蒸気や分離したお湯は還元井と呼ばれる井戸から地下に戻します。このように、地熱発電では一度使った熱水は捨てずに地下に戻し、再度加熱されて戻ってくるものをリサイクルできるようにしています。火力発電も原子力発電も、蒸気でタービンを回して発電するという点では同じですが、そのために化石燃料や核燃料が必要とされます。一方、地熱発電は自然界(地球内部)にある熱水そのものを利用する点が異なります。このため地熱資源は、太陽、風力、水力などと同じく自然エネルギー・再生可能エネルギーに位置付けられています。特に、世界有数の火山国である日本にとって地熱資源は豊富に存在する自然エネルギーであり、 CO_2 をほとんど排出しないクリーンエネルギーでもあります。

世界的にみると、世界最初の地熱発電は1904年にイタリアで実験が行われ、その後世界各地の火山を有する国で



第8図 A：岩手県の岩手山周辺に位置する葛根田地熱系，松川地熱系の立体模型，B：葛根田地熱系WD-1a製の説明パネルと関連する岩石標本

広まりました。日本では、2019年度現在、比較的大型の地熱発電所は20カ所建設されており、日本の電力の0.2%を賄っています。詳しくは、例えば <https://geothermal.jogmec.go.jp/information/> (閲覧日：2021年8月8日)をご覧ください。

地質標本館の地熱資源にかかわる展示は、2階第3展示室にあります。第8図Aは岩手県の岩手山周辺にある、葛根田地熱系、松川地熱系の立体模型です。地下深部にあるマグマの熱によって熱せられた熱水を使って、地熱発電所が稼働している様子が示されています。また第8図Bは、葛根田地熱系に掘削された地熱調査井WD-1aの説明パネルと、地熱地帯に産する岩石標本を展示したものです。このWD-1a井は、地熱系の深部に存在している、固結しつつある花崗岩体を掘りぬいたもので、この井戸の最深部の温度は500℃を超えていました。この研究成果は、今後の高温地熱系開発の指針となるだけでなく、地球科学的に非常に意義あるものとして評価されます(例えば、茂野ほか、2000)。

地中熱利用システムに関する展示も、同じく第3展示室内にあります(第9図A)。この模型では、地下100m程度まで掘削した井戸の中を、熱交換用の液体を循環させることで、夏は冷房、冬は暖房に利用できることを示してい

ます。また、実際に地質標本館に設置されている地中熱利用システムの坑井設備も、地質標本館前で見るができます(第9図B)。むろん地下にある坑井自体を目にすることはできませんが、これを使った地中熱利用システムのデモ機は、地質標本館内の1階映像室で実際に利用されています(内田・吉岡、2013)。

4. おわりに

以上、2回にわたって、地質標本館の展示標本・展示物を使って、「資源をつくる水のちから」を解説しました。地球は水の惑星とも言われますが、水は常に人間にとって欠かすことのできない重要な物質です。さらに、人間の生活を支える様々な資源は、水がなければ、その大半は形成されてこなかったことをご理解いただければと思います。今一度「水のちから」に感謝し、大切に扱っていくことをお考えいただければ幸いです。

また、コロナ禍が続く中、なかなか地質標本館においでいただくことも難しかろうと思います。一刻も早くコロナ禍が終息し、再び地質標本館の様々な展示物を自由に見学して地質学をより深く学んでいただける日が来ることを切に願っています。



第9図 A: 地中熱利用の模型(2階第3展示室), B: 地中熱利用のための坑井設備(地質標本館前庭)

謝辞: 小論を執筆するにあたり, 森田澄人博士(地質情報基盤センター)には粗稿を読んでいただき, 貴重なコメントをいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

文献

- 相場惇一(1979) 石油の移動と集積. 地学雑誌, **88**, 369-382.
- 相原安津夫(1979) §3.10 石炭鉱床. 第3章 地球の進化と鉱床の形成, 佐々木 昭・石原舜三・関陽太郎(編) 岩波講座 地球科学 14 地球の資源/地表の開発. 岩波書店, 東京, 135-143.
- 相原安津夫(1981) 石炭の起源と地質的变化. 鉄と鋼, **67**, 35-46.
- 赤木三郎・清水大吉郎・中井 均(1984) 双書地球の歴史 2 無脊椎動物群の海 オルドビス紀・シルル紀. 共立出版, 東京, 131p.
- 番場猛夫(1990) いま地球の財産を診る — 鉱床学と鉱物資源 —. 教育出版センター, 東京, 286p.
- 地質調査所(編)(1960) 日本鉱産誌 B V-a 主として燃料となる鉱石 — 石炭 —. 工業技術院地質調査所, 774p (本文), 87p (附表).
- 藤田和男(監修)・松本明光・島田莊平・島村常男・鷹背利公・藤岡昌司・牧野英一郎(編著)(2009) 今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい石炭の本. 日刊工業新聞, 東京, 159p.
- 木下浩二(1973) 石油資源の科学. 共立出版, 東京, 173p.
- 熊坂敏彦(2014) 「シェール革命」のインパクト — 「ガスの時代」の到来 —. 筑波経済月報, 2014年3月号, 14-17. (https://www.tsukubabank.co.jp/corporate/info/monthlyreport/pdf/2014/03/201403_10.pdf 閲覧日: 2021年7月23日)
- 松本 良・奥田義久・青木 豊(1994) メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源. 日経サイエンス社, 東京, 253p.
- 水垣桂子・佐脇貴幸・川畑 晶(2007) 地質情報展 2006 こうち 地熱資源と四国の温泉. 地質ニュース, no. 638, 10-13.
- 森田澄人(2006) 1-8 メタンハイドレート. 地質標本館(編) 地球 図説アースサイエンス, 誠文堂新光社, 東京, 134-135.
- 森田澄人・兼子尚知(2020) 珪質泥岩(硬質頁岩). 地質標本館おすすめ標本ストーリー. (<https://www.gsj>

- jp/Muse/story/src/story_036.pdf 閲覧日:2021年7月19日)
- 森田澄人・鈴木祐一郎(2006)1-7 燃料資源. 地質標本館(編)地球 図説アースサイエンス, 誠文堂新光社, 東京, 132-133.
- 森田澄人・谷田部信郎(2021)ケロジェン. 地質標本館おすすめストーリー. (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_038.pdf 閲覧日:2021年6月4日)
- 中島敬史(2015)石油の無機起源説に関する最近の進展. 石油技術協会誌, **80**, 275-282.
- 日本エネルギー学会(編)(2013)石炭の科学と技術 ~未来につなぐエネルギー~. コロナ社, 東京, 388p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会(編)(1999)よくわかる天然ガス —新しいエネルギー資源のすべて—. 日本エネルギー学会, 東京, 222p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会(編)(2008)天然ガスのすべて —その資源開発から利用技術まで—. コロナ社, 東京, 231p.
- 日本エネルギー学会天然ガス部会資源分科会 CBM・SG 研究会・GH 研究会(2014)非在来型天然ガスのすべて エネルギー資源の新たな主役(コールベッドメタン・シェールガス・メタンハイドレート). 日本工業出版, 東京, 270p.
- 大場紀章(2014)第3編第6章第1節シェールガス開発に伴う環境問題の現状. シェール革命 —経済動向から開発・生産・石油化学—, エヌ・ティー・エス, 東京, 193-200.
- 澤田結基(2010)珪化木の屋外展示. GSJニュースレター, no. 66, 7.
- 佐脇貴幸(2021)資源をつくる水のちから —その1 鉱物資源—. GSJ地質ニュース, **10**, 251-266.
- 佐脇貴幸・水垣桂子(2005)大地の贈り物:地熱資源と温泉. 地質ニュース, no. 615, 60-62.
- 佐脇貴幸・大谷具幸・水垣桂子(2001)大地の恵み 地熱資源を求めて. 地質ニュース, no. 560, 43-45.
- 石炭エネルギーセンター(2018)石炭データブック. 石炭エネルギーセンター, 東京, 274p.
- 茂野 博・村岡洋文・石戸経士・金原啓司(2000)「深部地熱資源に関する研究 —葛根田地域の深部地熱系の解析・評価を中心に—」の概要. 地質調査所報告, no. 284, 1-15.
- 島津光夫(2000)新潟の石油・天然ガス 開発の130年. 野島出版, 三条市, 284p.
- スキナー, B. J. [松尾禎士訳](1971)第7章エネルギー—化石燃料の系譜. 地球科学入門シリーズ7 地球資源学入門, 共立出版, 東京, 123-145.
- 鈴木庸一・真下 清・山口達明(2008)有機資源化学(初版第5刷). 三共出版, 東京, 236p.
- 田口一雄(1998)地学ワンポイント6 石油の成因 —起源・移動・集積. 共立出版, 東京, 140p.
- 高橋雅紀(2017)東西日本の地質学的境界【第六話】日本海の拡大. GSJ地質ニュース, **6**, 113-120.
- 天然ガス鉱業会(1998)日本の石油と天然ガス. 天然ガス鉱業会, 東京, 436p.
- 手塚真知子(1990)ポピュラーサイエンス 素顔の石油. 裳華房, 東京, 227p.
- 徳永重元(1967)地下の科学シリーズ10 石炭のはなし. ラティス, 東京, 156p.
- 辻野 匠(2017)珪化木. 地質標本館おすすめ標本ストーリー. (https://www.gsj.jp/Muse/story/src/story_019.pdf 閲覧日:2021年7月28日)
- 内田洋平・吉岡真弓(2013)地質標本館の地中熱システム. 産総研 TODAY, **13**, no. 9, 9.
- 氏家良博(1990)石油地質学概論. 東海大学出版会, 東京, 128p.
- 巨理俊次(1966)九州の松岩の樹種 —昭和41年11月12日 石炭学会会議講演—. 燃料協会誌, **45**, 833-838.

SAWAKI Takayuki (2021) Water's function that produces geo-resources: (2) Fuel and geothermal resources.

(受付:2021年8月19日)