

---

 総 説
 

---

## 放射能から火山・地熱・温泉へ(II)

村上 悠紀雄

## Trial Approach to the Function of the Volcanoes, Geothermal Sources, and Spa from a Standpoint of the Radioactivity (II)

Yukio MURAKAMI

Atomic Energy Safety Engineering Center  
Kitasato Research Center of the Environmental Science

## 11 元素の生成と超新星の爆発

さて元素の宇宙存在度をみると、原子番号と共に特色ある規則的な減少を示している。しかし隕石、太陽、地球と個々にみると、若干の元素の存在量にはきわめて大きな差異がみられる(たとえば太陽、星ではH, Heが多いが、Li, Be, Bがごく少ないなど)。しかしその他の大部分の元素についてはよく似た同じ傾向(図11)である。したがって、ときに信頼できるデータがない場合には、この図がその推定に使われるくらい役にたっている。

宇宙をつくる物質のものである元素は一体どのようにしてでき、どうしてこのような差異を生じたかに関心が集り始めた。この30年来 宇宙の始源、素粒子から元素がつくられ、この存在度を与えるような核反応をみつけることに多くの人が集中した<sup>13)31)32)33)</sup>。

図11とよく似た図が他にもあった。原子力開発につれ全元素の速中性子捕獲断面積の測定がされたが、その変化状況は原子番号の関数であり、しかも ${}_{35}\text{Br}$ までほとんど指数関数的に減少し、さらに高い原子番号の元素ではほとんど一定に少しずつ減少していきよくなっている。そこで原子核の安定度の知識を付加すると、元素生成の核反応を考えるのに(特に中性子捕獲過程に)きわめて有効であった。

また地球、月、隕石、太陽で、存在場所をとわず若干の元素の同位体組成を求めるとみな同一であった。ということは均一な同じガス星雲からつくられたことを示している。また星のスペクトルの赤色転移が語る銀河の過去はいずれも共通の場所から互いに遠ざかっていく\*1という過程もわかり、元素生成には平衡理論にかわり、ビックバン理論が急速に支持され始めた(Iの脚注13参照)。

放射化学の講義ならばこのあたりは最も楽しい部分だが、紙幅が許されないので成書にゆずらざるをえない<sup>13)32)33)34)</sup>。

しかしこのシナリオの展開には太陽エネルギーの発生\*2にふれざるをえない。

まず水素だが宇宙存在度をみると(表9)、原子数で93%、質量で73%をしめている。太陽では

[脚註] 前号(37巻2/3合併号)にひきつづくもので、講演要旨に補足して文献を引用したものである。  
所属: (財)原子力安全技術センター, (財)北里環境科学センター

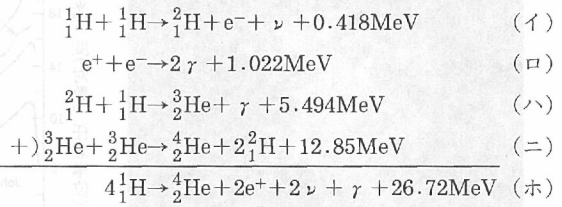
表9 元素の宇宙存在度(質量)

元 素	割 合
水素 ${}^1\text{H}$	0.73
重水素 ${}^2\text{H}$	$10^{-4}$
ヘリウム ${}^3\text{He}$	$6 \times 10^{-5}$
${}^4\text{He}$	0.24
Li, Be, B	$1 \times 10^{-8}$
C, N, O, Ne	$1.8 \times 10^{-2}$ ~ 2 %
ケイ素群 Na~Sc	$2 \times 10^{-3}$
鉄群 $50 \leq A \leq 62$	$2 \times 10^{-4}$ } ~0.2%
中重元素群 $63 \leq A \leq 100$	$10^{-6}$
重元素群 $A > 100$	$10^{-7}$

質量数Aをもつ元素を意味する

W.A.Fowler, Nuclear Physics Memoire of the Am. Philos. Soc. Philadelphia No. 67 (1967)

表10 太陽にみられる核融合反応(発熱反応)\*3



4素反応(イ,ロ,ハ,ニ反応)でエネルギーを発生するが,結果的には4個のHから ${}^4\text{He}$ に核融合し(質量の減少を起し)(ホ反応),したがって莫大なエネルギー(表面温度5800K,中心温度1500万度)を何十億年も発生しつづけているのである(表10).

$$4.00260325({}^4\text{He}) - 1.007825037 \times 4({}^1\text{H}) = -0.0286989u = -26.72\text{MeV}$$

その結果 太陽定数で示される大きなエネルギーの恩恵を地球に与え,大気海洋のエネルギーバランスをとり\*4,地球上に水,海洋を保持し,生物の進化を促し,地球の今日の姿の基本をつくっている\*5).

星の内部でこれより次第に重い元素の核融合を起し,また中性捕獲過程やその他  $\beta$ ,  $\alpha$ -過程で ${}^{209}\text{Bi}$ まではでき,図11(I-10参照)の如き存在度を与える.これらのことは種々の星の温度スペクト

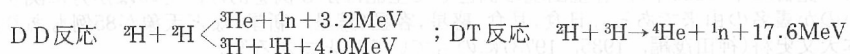
\*1 宇宙のあらゆる方向から等方的に地球は入射してくるマイクロ波の波長が3°Kの黒体輻射に相当することがわかり(1965年)注目された.膨脹につれドップラー効果で波長が長くなり,3°Kの黒体輻射になったといわれる(I-脚註13参照).

\*2 核融合によるもので,地上で核融合炉の実現は2100年になってもむづかしいだらうといわれている.実現しえた核融合は水素爆弾にすぎない状況が技術の現状である.

\*3 最下式(ホ)のヘリウムのできる核融合の式は,(イ)×2+(ロ)+(ハ)×2+(ニ)で出る.(イ)は陽子が電子 $e^-$ を出し重陽子となり, $e^-$ を陽電子 $e^+$ がとり物質消滅して2個の $\gamma$ 光子となる(ロ). $\gamma$ 光子は星の内部で長い間にぶつかりあい熱にかかわって重力収縮に抗する力となる(一定の大きさを星がたもてる).ニュートリノ $\nu$ は宇宙外にエネルギーを持ち出してしまふ.

\*4 このため水素は $10^{20}$ g/秒(太陽の質量は $1.98 \times 10^{33}$ g)用いられている.大気圏外で太陽に正対した $1\text{cm}^2$ /分間に $1.95\text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$ ( $\equiv 1.36\text{kW/m}^2$ )の輻射エネルギー(太陽定数)がきているが,地球内部のエネルギーに関係することはなく,地表や大気の循環のエネルギーバランスに参与しているだけである.1年間に地球にくる太陽エネルギーは1500Qである.

核融合炉ではもっと低温で起りうる下記の反応を起そうとしている.



1954年水素爆弾としてDT反応を実現した. ${}^{235}\text{U}$ の核分裂(広島型原爆)の高温を起爆材として用いたが,核融合炉ではそうはいかない. ${}^1_1\text{H}$ から ${}^{26}_{56}\text{Fe}$ までの軽い元素は陽子の数が少ないので二個の核があるよりは一つになった系(核融合)の方がエネルギーが低くなり安定である(エネルギー発生).重い核特にU,Thになると陽子を多く含んでおり,これに粒子が加わると,陽子の斥力が核をまとめている力(核力)を上廻り,重い核はわかれ(核分裂)エネルギーを発生し安定となる.

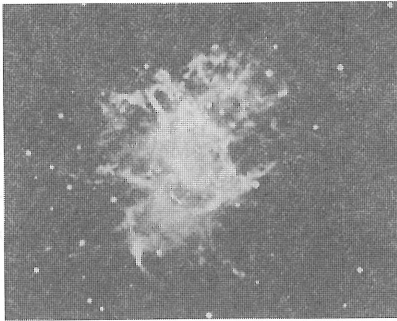
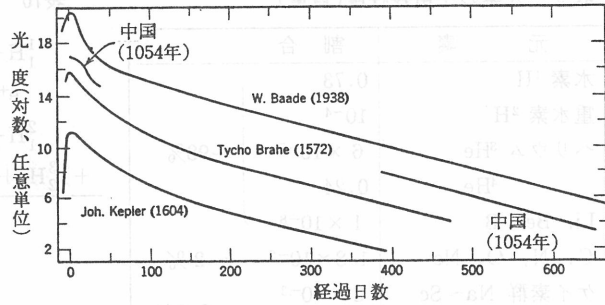


図13 カニ星雲

岡山天体物理観測所の188cm 反射鏡で撮ったカニ星雲の赤色光写真。二つ並んだ星の右下のほう(矢印)がカニ星雲の中心星で、爆発の元の中性子星にちがいない。

石田五郎他「かに星雲の話」93p.<sup>37)</sup>より

図14 超新星の光度曲線<sup>38)</sup>(観測記録よりつくる)

横軸は極大の光度になってからの経過夜の数で、縦軸は光度(単位は任意)の対数で、各曲線の始まる位置は任意に示した。中国以外は観測者名と年号を示した。

ルの実測による星の進化<sup>\*5</sup>の考えのもとに支持されている。しかしU, Thなど放射性元素の生成は期待できなかったが、超新星の爆発でその手がかりがつかめた。

しかも鎌倉時代の藤原定家の明月記や中国の古記録が裏付となったのである<sup>36)</sup>。つながりの詳細は省略せざるをえないが、カニ星雲の膨脹をみつけ(1921年)、これを過去に戻していくと、900年前の一点に集まった。

宋史天文誌の記録(1054年7月4日)によると、「東の空に金星のように四方に光芒を放ち色はやや赤味があり、23日間は昼間もよく見え、56年3～4月に見えなくなった」という。明月記では<sup>46)</sup>、これを客星出現の例(天喜二年4月(1054年5～6月))として<sup>\*6</sup>、「丑時客星出觜参度見東方、孛天関星大如歳星」と記録しており、日中22日間も輝き、22ヶ月もよく見えたとある。

オランダのライデン大学のカニ星雲の測定とこの記録が一致した<sup>37)</sup>。そこでこれこそ超新星<sup>\*7</sup>の爆発の残骸であると結論した。さらに現在の測定と古記録とてらし合せ<sup>\*8</sup>、わが銀河系にはカニ星雲(1054年)のほかカシオペア座(1572年)、ヘビつかい座(1604年)など(図14)、他の銀河にアンドロメダ星雲(S星1885年)など7個の超新星が見つかった。

図14は明るさの減少の状況をこのように記録されたデータから書いた光度曲線で<sup>38)</sup>、半減時間が55日くらいで<sup>254</sup>Cfによるものでないかといわれた。そして元素合成のB<sup>2</sup>FH理論のrapid過程で<sup>209</sup>Biをこえる重い元素の合成の可能性が明らかにされた<sup>32)33)34c)</sup>。

話はかわり水爆実験のさい(エニエトック環礁、1952年)<sup>254</sup>Cfが発見された。起爆材ウラン235中の<sup>238</sup>Uが、高密度中性子束中で16個を連続捕獲して、β<sup>-</sup>崩壊し<sup>254</sup>Cfができ、元素生成の理論の実証となった<sup>34a, b)</sup>。<sup>252</sup>Cfは自発核分裂し(99.8%、残りはα崩壊)正確な半減期は60.5dで、

<sup>\*5</sup> 星間ガス→原始星→主系列星→赤色巨星→超新星の爆発又は白色矮星となることを意味する。

<sup>\*6</sup> 鎌倉時代の歌人 藤原定家(新古今集、小倉百人一首の選者としてしられる)の56年の生涯記録である。寛喜二年(1230年)に客星出現の例として上記ほか8例をあげ、そのほか月に関する記述が多いのが書名の由来である。日食、月食、惑星、客星(慧星、新星)など天象が85例もあり、有名な日本天文史料(神田茂編、1935、1978)にのっているほどである<sup>36)</sup>。

<sup>\*7</sup> 星が急激に光度を増しやがて減少していくとき新星novaというが、とくに明るいものを超新星supernovaという。

<sup>\*8</sup> 中国、日本では宮中天文官の観察記録が古くからあり、このようにその正しい科学的記述が近年の測定で確認されている。これは農耕民族である帝王や君主は、農民に正しい稲のまきつけや農事暦を教へる必要があり、したがって天文気象の記録をもつことは帝王として不可欠であったためといわれている。狩猟民族であるヨーロッパなどでは考えられないことであろう。

重い元素の核分裂生成物(原子番号<sub>30</sub>Zn~<sub>65</sub>Tb くらい)を生ずることがわかった\*9. しかしどれだけの質量を超新星から放出したかあきらかではなく、色々問題はまだある\*9).

星としては比較的若い太陽や惑星は、古い星より重い元素を相当に多く含んでいることが観察されている\*10. ビックバーンでできたH, Heなどガス星雲とこの爆発でできた重い元素とが、凝縮して地球などはできたと考えられている.

## 12 地殻の化学組成とウラン、トリウム

元素がつくられ宇宙存在度が推定できたが、これから我々が知っている地殻(16km 深しか情報がない)が出来上がらなければならない. その平均組成を求めるため色々の試みがなされたが、それらの数値はいづれも大差がない\*10. 図10に示したように地球が層状構造をもつことはその大きな特性で、過去において熔融分化し元素の分布がかわり地殻ができたのである\*11.

多さの順にみると、酸素46.6, ケイ素27.7, アルミニウム8.13, 鉄5.63, カルシウム3.63, ナトリウム2.83, カリウム2.54, マグネシウム2.09の8元素で99.15%(重量)になり\*12, チタン, リン, 水素などがこれにつづき, Th, Uは7.2, 1.8 ppm(重量)である.

これが地球全体の組成となるとむづかしく、隕石の結果にたよらざるをえない\*11). それによると地殻表面にむかって地殻よりは少ないがNa, K, Al, U, ハロゲンにとんでおり、内部にむかって地殻よりぐんと多いMg, S, Fe, Cr, Co, Niがある.

地殻の放射性元素U, Th, Kなどをそれらの宇宙存在度とくらべると(表11)\*12), 著しい差異があり、あきらかに地殻に濃縮されていることが示されている.

熔融分化における各元素の化学行動の差異が地殻の組成に反映しているはずである. 元素はイオンの大きさ, 電荷, 化学ポテンシャルなどにより化学行動が異なり、したがって親鉄, 親銅, 親石, 親気の各元素群にわけられる\*13 (V.M.Goldschmidt<sup>1-26</sup> 参照). 放射性元素U, Th, K, Rb

表11 放射性元素の宇宙, 地殻存在度の差異

元素	(Si=10 <sup>6</sup> 原子)		存在度(重量ppm)		
	宇宙存在度	地殻存在度	G-1 花崗岩	地殻	W-1 閃緑岩
K	3,810	67,100	45,500	25,900	5,300
Rb	5.86	110	220	90	22
Th	0.040	3.1	52	7.2	2.4
U	0.0102	0.77	3.7	1.8	0.52

註 天体物理学ではHを10<sup>12</sup>としてノルマライズしているがそのときSiはほぼ10<sup>7.5</sup>となる. 宇宙存在度の基準にしたC1コンドライトのSiは105,500ppm(重量), 地殻存在度ではSiは277,200ppm(重量)である. G-1, W-1は米国地質調査所(U. S. Geol. Surv.)とMITでつくった分析用の標準岩石で、酸性岩と塩基性岩の代表例となった. U, Th, Kに大きな差異がみられる点に注目したい. M. Fleischer, Geochim. Cosmochim. Acta, 29 1263~1283 (1965)

\*9 このほか宇宙線の起源は超新星の爆発といわれている. したがって宇宙線の化学組成をみると元素の合成を教えてくれる. 質量が太陽の1.4倍以上の重い星は超新星として爆発して一生を終る. 電波天文学の発展は超新星の研究を促進し、他の銀河系にも超新星をみつけた. さらにロケットによるX線天文学は有効な手段となっている. パルサー(中性子星), ブラックホールと超新星に関心が集まっている\*37).

\*10 その意味で二代目の星であり種族Iといわれている. 一代目の星は種族IIである. 太陽は種族Iの星である.

\*11 地球をリンゴにすれば、地殻はうすい果皮にしかあたらず、質量は1/250にしかならない.

\*12 OはSiO<sub>2</sub>として地殻の3/4をしめ、他の6元素とケイ酸塩となる. 原子数でいうと地殻の100原子数の62.5はOであり、地殻の体積の93.77%は酸素がしめている. これは酸素原子が他よりとびはなれて大きいからである. 二番目のケイ素でも体積では1%にすぎない. しかし4個で岩石の三次元構造の中心となり、O, Si, Al, Feなど他元素と結合し、多様なケイ酸塩をつくっている. 同族のCが4個で三次元構造の中心となり、生体成分の多様さを示すのとにている.

\*13 ドイツのマンスフェルト産含銅スレートの熔鉱炉でのカラミ(珪酸塩), FeとCuの硫化物層, 鉄層などへの分配の結果にもとづいている.

はいずれも親石元素で、したがってAl, Naなどのケイ酸塩と共に地殻に大きく濃縮された<sup>43)</sup>。そしてTh/U=3.9である<sup>44)</sup>。

表12 地殻中の放射性元素存在量 (ppm)

元素	地 殻	花崗岩	玄武岩	頁 岩	海 水
U	2.7	5.0	0.5	3.5	0.0032
Th	8.5	20.0	1.5	12.0	10 <sup>-5</sup>
Th/U	3.2	4.0	3.0	3.4	0.003
Rb	90	150	30	140	0.12
K	2.1%	3.2%	0.8%	2.5%	380

K.B. Krauskopf, Introduction to Geochemistry 2nd ed. McGraw-Hill, N. Y. (1979)より作成

アン)をみると<sup>45)</sup>、それぞれマフィック<sup>\*15</sup>な火成岩 0.9(0.5), 2.7(1.6); 閃緑岩, 石英閃緑岩 2.0(1.7), 8.5(7.0); 花崗閃緑岩 2.6(2.3), 9.3(9.0); シリック火成岩 4.7(3.9), 20(16)ppmである。平均値のTh/U比はそれぞれ3.0, 4.2, 3.6, 4.3でこの傾向を裏付けている。

KとU又はThのとの相関係数も、マフィックな岩石から中性岩では0.89, 0.93とよいが、花崗岩ではKとUは0.73と小さくなる。これは花崗岩は玄武岩より酸化され易く、Uが6価になると水に溶け易く流亡するためである。平均して花崗岩質岩石では、Th/Kは $5.0 \times 10^{-4}$ , U/Kは $1.3 \times 10^{-4}$ , 玄武岩質岩石ではそれぞれ $2.8 \times 10^{-4}$ ,  $0.6 \times 10^{-4}$ である<sup>\*16</sup>。一般的な傾向として花崗岩質岩石の方が玄武岩質岩石よりKが多い。

岩石中のU, Thであるが<sup>\*17</sup>、その造岩鉱物中にはppm オーダで存在している。しかし従属鉱物のジルコン、褐簾石、モナザイト、ゼノタノム、ピクロールなどにはケタ違いに多いのが注目される<sup>46)</sup>(表13)。たとえばジルコンは花崗岩には多いが、塩基性のはんれい岩、超マフィックな岩石には珍しい<sup>1)</sup>。そして風化されないところより、メタミックな部分に10倍も多いことは珍

表13 火成岩中の従属鉱物のU, Th含量(ppm)<sup>46)</sup>

造 岩 鉱 物	U	Th
褐 簾 石 { 従属鉱物 ベグマタイト	30~700	500~5,000
	?~100	10,000~20,000
リ ン 灰 石 { 従属鉱物 粗 粒	5~150	20~150
	10~50	50~250(?)
磁 鉄 鉱	1~30	0.3~20
モナザイト	500~3,000	25,000~200,000
ゼノタイム	500~35,000	低
ジ ル コ ン { 従属鉱物 巨晶花崗岩	300~3,000	100~2,500
	100~6,000	50~4,000

\*14 U<sup>4+</sup>, Th<sup>4+</sup>の標準酸化還元電位は-2.39, -1.90Vで、Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup>の-2.36, -1.66, -1.62Vに近い。

\*15 玄武岩よりMg, Fe含量の多い岩石をいう。超塩基性岩という人もある。

\*16 地殻の岩石でTh/K, U/K比を $1/1.9 \times 10^3$ ,  $1/7.4 \times 10^3$ で、Th/Uを3.9とすると、地殻上部の貫入岩ではKは2.74%となる。そしてThは14.4, Uは3.7ppmとなる。花崗岩44, 花崗閃緑岩34, 閃緑岩石英閃緑岩9, はんれい岩13%(容積)と見積った(K.H. Wedepohl)荷重平均のK, Th, Uの値に極めて近い<sup>47)</sup>。

\*17 岩石試料が十分にあれば造岩鉱物にわけて定量がおこなわれる。

しいことではない。したがってジルコンを0.1%も含む巨晶花崗岩では、U、Thから出る $\alpha$ 線は1500 $\alpha$ /mg・時にも達する。前回このような放射性元素の崩壊熱により容易に1000℃(岩石の融点以上)になりうることを示した。

求めた大陸地殻上部(33km厚)\*18のK、Th、Uの崩壊熱は、地殻熱流量の実測とよくあい重要な熱源である<sup>47)</sup>ことがわかった。

### 13 マグマの発生

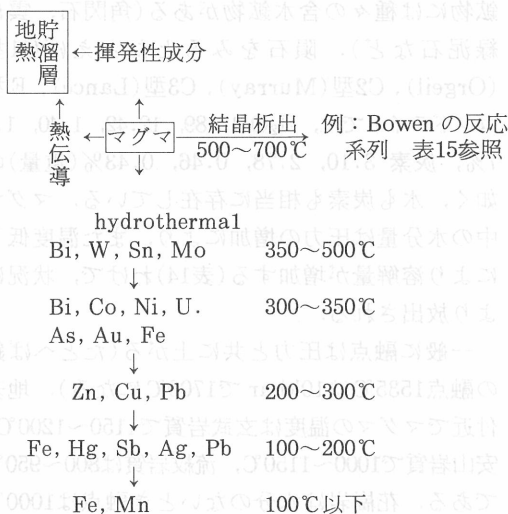


図15 マグマの冷却にともなう生成物

図15 マグマの冷却にともなう生成物。地熱地帯もこれと分布がほぼ一致している。これは世界的にみて火山、温泉に関する顕著な共通の傾向である。

プレートが海嶺で生まれ、海溝で沈み込んでいる。一年に数cm動く大洋プレートは海底堆積物をのせたまま、沈みこんでいく。比重の軽い方は海溝をこへ付加されるが、重い方は下へもぐり込む。

マントル内では1kmにつき10~20℃の温度上昇がある。したがって深さに応じて昇温し固体中で部分熔融\*20が起り(アセノスフェアの低速度層\*21に)、生じた液滴は次第に大きくなり、上昇を始めマグマになる。

マントル上部に生じたマグマは火山としてまた温泉の熱源として重要であり、当然地殻の組成と深い関係がある。

さて地球物理学、地質学に革命的な知見を与えたプレートテクトニクス理論(1965年以降)によると<sup>48)</sup>、わが国はアリュシャン列島から九州、フィリピンへつながる典型的な島弧island arcで、太平洋側には千島海溝、日本海溝、マリアナ海溝などがあり、火山の海溝側境界は明瞭で火山帯前線をつくっている。

しかも海溝にそう深発地震面の100、200km等深線\*19と2種の玄武岩の分布地域の境はほぼ一致している<sup>48b)</sup>。

また90℃以上の温泉の分布は火山の分布とほぼ一致し、これより低温の温泉はやや広範囲にひろがっている。

\*18 モホロビッチ不連続面直下(平均大陸地殻35km厚)で圧力10kbar、450℃、400kmで130kbar 1500~1800℃と推定される。(表14参照)

地殻の下のもホロビッチ不連続面からマントルは2900kmもあり(図11)、地球の質量の67.2%、容積の90%をしめているが、まだ深さ200~300kmまで(地球の半径の5%くらい)の岩石鉱物を入手したにすぎない。マントル(Mgの多い超塩基岩にとむ)と地殻(ケイ素、アルカリ、アルミニウムにとむ岩石)をわける化学的な境界面がモホロビッチ不連続面である。

\*19 深発地震の震源が太平洋側から日本海側にむかって次第に深くなる面上に分布している。地震学ではベニオフー和達面とよんでいる。この深発地震面は沈みこみ帯からマントルの中に入ったプレート(スラブともいう)の上面近くを表わしている。マグマの発生しうる条件の場所が深発地震面と関係あることを暗示している。

\*20 2成分以上の複雑な系を加熱するときみられる現象で結晶と液体が共存している状態をいう。岩石が融解してマグマになる過程で考える。

\*21 温度が上がるとS波の速度がおそくなり、相当な高温であり、低融点成分の部分熔融が起っていると考える。プレートテクトニクスではリソスフェアとアセノスフェアにわける。リソスフェア(岩石圏)とは地表から低速度層の上部までをいい、地殻と上部マントルからなる。

別の考え方によると、沈み込み帯の上面(スラブ)で高温の水(または熱水<sup>ハイドロサーマル</sup>)を生じ(臨界圧225.7気圧, 臨界温度374.4℃), 上部マントルに供給され部分熔融を起し, 揮発成分をとかしマグマとなるという. まだどちらともいへない状況である<sup>49)</sup>.

密度, 粘性の差で上昇し, 圧力低下, 温度低下にともない, 高融点のものは析出し, また低融点のものをとかしこみ, またCO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, 硫化物やその他の揮発性成分の分離が起る. 地表に出れば噴火であり, 地殻に貫入して固化すればマグマ溜りである. この位置の測定こそ火山や地震にとって重要な問題だがまだできていない. しかしその存在を疑う人はいない\*<sup>22</sup>.

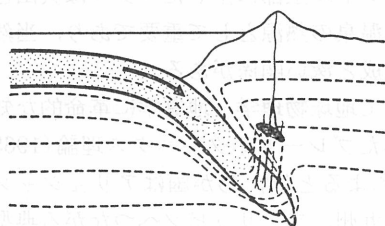


図16 マグマ発生の一例

わが国のように地殻の厚い火山弧では安山岩が比較的多い場合に都合よい説明で, 沈み込み帯から脱水反応で生じたH<sub>2</sub>Oが上昇し上部マントルで部分融解を起して安山岩質マグマを生ずる.

久城, 荒牧 岩波講座地球科学3, 174頁より

をこえているが, 水が入ると600℃のように下がる. 上部マントルにおけるH<sub>2</sub>O またCO<sub>2</sub>の役割は大きく, マグマの組成に影響をもっている<sup>49)</sup>. 地表近く又は地上にでて圧力がへるさい, マグマが急冷するか徐冷するかで岩石相は異なってくる. 表15はこの結果を示したものである.

マグマと水とは一寸意外な感がするが, 造岩鉱物には種々の含水鉱物がある(角閃石, 雲母, 緑泥石など). 隕石をみるとたとえばC1型(Orgeil), C2型(Murray), C3型(Lance), E型コンドライトでは, H<sub>2</sub>O 19.89, 12.42, 1.40, 1.17%, 炭素 3.10, 2.78, 0.46, 0.43%(重量)の如く, 水も炭素も相当に存在している. マグマ中の水分量は圧力の増加により, また温度低下により溶解量が増加する(表14)わけで, 状況により放出される.

一般に融点は圧力と共に上がる(たとへば鉄の融点1535℃は10kbarで1700℃になる). 地表付近でマグマの温度は玄武岩質で1150~1200℃, 安山岩質で1000~1150℃, 流紋岩質は800~950℃である. 花崗岩は水分のないとき融点は1000℃

表14 マグマ中の水の溶解度(Hamilton et al 1964, Burham et al 1962)<sup>52)</sup>

マグマの組織	温度℃	H <sub>2</sub> O [重量%]				
		0.5kbar	1kbar	2kbar	3kbar	5kbar
玄武岩質(コロンビヤ台地玄武岩)	1100	(1.6)	3.1	4.6	5.9	8.5
安山岩質(フード火山溶岩)	1100	(2.7)	4.5	6.0	7.4	9.8
流紋岩質(ハーディング・ベグマタイト)	660~720	(3.0)	4.6	6.5	8.3	10.9

圧力bar 単位を10倍すると水深mとなる.

表15 マグマの冷却と火成岩の種類

SiO <sub>2</sub> %減少→	61%以上酸性岩	中性岩	52~42%塩基性岩
徐冷(粗粒)	花崗岩 花崗閃緑岩	閃緑岩	はんれい岩
急冷(細粒)ガラス質	流紋岩 石英安山岩	安山岩	玄武岩
卓越する鉱物	長石, 石英	長石(石英ナシ)	鉄マグネシア 鉱物と長石(石英ナシ)

\*<sup>22</sup> ハワイのハレマウマウ火口の南方で1000~1260m までボーリングした. 昇温率は37℃/100m を示し, このまま地温が上昇すると, 4km で約1200℃となる. マグマ溜りの上縁とみられる<sup>50)</sup>.

### 14 地球の熱エネルギーと化石原子炉

地球の熔融分化, 造山運動, 火山活動, マグマの生成などは地球の熱史として関心がもたれている. 熱エネルギーの収支を考えてみる. 始源物質が集積して地球が形成されたとする, これらもっていた重力ポテンシャルエネルギーは一回限りだが熱エネルギーに変換される. またコア形成のさいも持っている重力ポテンシャルエネルギーの熱変換分が見込まれる\*24 (表16)<sup>54</sup>. このほかに放射性元素の崩壊熱の発生が何十億年とつづいている. 図5で示した如く古い時代ほど崩壊熱は大きい. したがって当時は熱対流は大きく, リソスフェアはもっと薄くて破壊され易く, プレートの総数ももっと多かった可能性がある. そしてマグマは現在よりも浅い深度で生じたといわれる.

逆に将来この地球内部の熱源が衰弱してくると, プレートは厚くなり, 運動はおそくなり, やがてプレートの運動も停止することも考へられる. まさにこの20億年位は環太平洋各地の沿岸はプレートテクトニクス場といえよう\*23.

さて熱エネルギーの支出をみると, 火山, 温泉, 地震, 地殻熱流量などである (表16). バランスをみると収入が少し上廻り, 地球は冷えていく状態ではない. 地球形成時の集積による重力エネルギーと放射性元素によるエネルギーの和は, 45億年間の地殻熱流量の和の数倍も大きい. これは地殻熱流量や地質活動が古くはもっと盛んであったことを意味する. しかもまだ研究不十分な消滅核種の崩壊熱<sup>56</sup>の大きさが加味されていない. 放射性元素の発熱の持続性を考えると, その働きがあつてこそ今日の姿を保っているといえよう.

表16 地球のエネルギー収支(入山1973年)<sup>54</sup>

	エネルギー支出		エネルギー収入		
	1年あたり J/年	45億年の総計 J	エネルギー収入	1年あたり J/年	45億年の総計 J
火山活動	$3 \times 10^{19}$	$1.4 \times 10^{29}$	放射性元素の崩壊熱	$9.5 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{31}$
温泉地熱	$2 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{27}$	集積による重力 Pot. E.		$< 2.5 \times 10^{31}$
地震	$(4 \sim 7) \times 10^{17}$	$(2 \sim 4) \times 10^{27}$	コア形成による重力 Pot. E.		$\sim 1.5 \times 10^{31}$
地殻熱流量	$9.5 \times 10^{20}$	$(0.5 \sim 3) \times 10^{31}$			
計		$(0.5 \sim 3) \times 10^{31}$	計		$< 5 \times 10^{31}$

註  $10^{31}$  Jは10Qを少し上廻り, 全地球を1500°Cに又は全コアを7500°Cにあたためるに十分である<sup>55</sup>

\*23 世界各地の島弧(日本も含め)の火山岩中の宇宙線起源の  $^{10}\text{Be}$  ( $\beta^-$ ,  $1.6 \times 10^6$  y)を 加速器質量分析法で定量結果によると, 陸上地域のものと同程度の有意の差があり, 沈み込みのさい持込まれたという考えを支持している<sup>53</sup>. プレートの沈み込みでマントルへ地殻から物質補給をしている. 高レベル放射性廃棄物を沈み込み帯においたらとの考へが出されたことがある. 崩壊熱の影響の評価がむづかしく疑問がある.

\*24 重力は物質を互いにひきつける力があり, 密度にゆらぎがあるとひきつけ力が大きくなっていき, ますます収縮する効果がある. 収縮するにつれ中心部で熱にかわり, 内部が高温になる. ガス圧は高まり, 外側の層部を支える力と釣り合い収縮がとまる. 熱は当然一部は逃げるので重力が優勢になり収縮がはじまる. 星では核生成のさいのエネルギーが補給され, 収縮はあるところでとまる.

現在のところ地球の集積形成とコア形成は同じ頃おこなわれたとみられる, また集積の速度がわからないと, 一部は表面から輻射エネルギーとして失われるわけで, 変換したエネルギーのどれだけが内部エネルギーとしてたくわえられたかわからない.



崩壊熱の主力は図5からわかるように、半減期の比較的短い $^{235}\text{U}$ 、 $^{40}\text{K}$ である。長命な $^{238}\text{U}$ や $^{232}\text{Th}$ は十分な存在量があり、定常的な熱供給は当分つくであろう。たとへば現在のウランでは存在量は $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}=1/137.8$ である<sup>2)</sup>。45.5億年前に減衰の補正をすると0.3165となる。すなわち $^{235}\text{U}$ は現在量の約63倍もあり、 $^{238}\text{U}$ は2倍もあったわけで、まさに濃縮ウランの状態だった。 $^{232}\text{Th}$ (140億年)にいたってはまだ8割が健在で、将来のエネルギー源なのである。さしてこうして過去をふり返ると、ウラン鉱床中に自然に原子炉ができ、自力で核エネルギーを発生した可能性が予想される。1972年9月アフリカ西海岸赤道下のガボン共和国オクロ鉱床で、通常の $^{235}\text{U}$ 0.7205%より異常に低いウランが見つかった。この異常に低い同位体比の解釈に困った<sup>57)</sup>。

U-鉛法、 $^{87}\text{Rb}-^{87}\text{Sr}$ 法、 $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ 法などで生成年代をはかると、鉱床生成が18~20億年と出た。また鉱床中に長寿命の核分裂生成物の $^{144},^{145}\text{Nd}$ 、 $^{147}\sim^{149}\text{Sm}$ 、 $^{152}\text{Gd}$ が異常に多いことがわかった。そこで $^{235}\text{U}$ ( $7.04\times 10^8$ 年)の20億年前の量を現在の値から求めると5%以上となり、まさに濃縮ウランの状態である。すなわち鉱床自体が濃縮ウランであり、減速材の役割をする水があり、自然の状態で原子炉ができるはずである。

$^{238}\text{U}$ からできた $^{239}\text{Pu}$ もみつき、その核分裂を示すトラックも、高温の微候も、核分裂生成物もみつき、またその崩壊系列の終端の安定核種も測定され<sup>\*25</sup>、核分裂が起ったことはもはや疑いがなかった<sup>58)</sup>。

原子炉物理のデータを用いて結果を解析すると、中性子束は $1.5\times 10^{21}\text{n/cm}^2$ (積分値)で、500トンのウランが核分裂し、30kW くらいの出力で50万年くらいつづいたと推定された。 $^{239}\text{Pu}$ やウランの核分裂生成物<sup>2)</sup>の定量値が計算値と一致していた。すなわち自然の状態で原子炉ができた結論され、化石原子炉とよんだ<sup>\*26</sup>。先カンブリア紀の粘土質砂岩、緑色粘土にはさまれた鉄床であり、約18億年前に沈積生成したウランは濃縮ウランの状態で、連鎖反応は約50万年つづき、核分裂の主役の $^{235}\text{U}$ は消費され0.29%と低くなり、ついに停止したのである<sup>60)</sup>。

これにふれたのはU、Thのエネルギー源として、きわめて有効な使ひ方だからである。前回計算した崩壊熱は(表2)、 $^{238}\text{U}$ 一原子より51.70MeV、 $^{235}\text{U}$ では46.39MeVであるが、原子炉すなわち核分裂では一原子の $^{235}\text{U}$ から~200MeV近いエネルギーを発生できるのである。この例の化石原子炉がどこかに発見され大きな役割を果している可能性の夢をもっているのである。

## 15 地表から逃げる熱——地殻熱流量

地球から失われる熱量(熱輸送量)Qは、熱伝導による部分Qcと火山温泉などによる放出部分Qtとからなる。

$$Q = Qc + Qt$$

古くから経験的に地下増温率2~3℃/100mが知られているが、これは地殻熱流量Qcに関係している。太陽エネルギーの<sup>\*27</sup>影響のない深い孔の二点間(dx)の温度差dTを測り、孔壁の岩石の熱伝導率K( $4\sim 8\times 10^{-3}\text{cal/cm s degC}$ )を測定すると計算で出る。 $10^{-6}\text{cal/cm}^2\text{s}$ ( $\equiv 42\text{mW/m}^2$ )を単位とし、HFU(Heat Flow Unit)で示される<sup>54)</sup>。

$$Qc = -K dT/dx$$

\*25 前回のべた消滅核種 $^{244}\text{Pu}$ と $^{129}\text{Xe}$ の異常と関連して天然原子炉の存在を考えた一人はP.K. Kuroda(黒田和夫)である<sup>59)</sup>。温泉化学の初期に多くの地球化学的研究をした人である。

わが国の原子力発電は濃縮ウラン( $^{235}\text{U}$  3~5%)を用いて連鎖反応で核分裂させたエネルギーを利用している。

\*26 世界で最初に原子炉ができたのは1942年12月2日のことであり、自然の秩序の正しさに心ひかれるのである。

\*27 太陽エネルギーの日変化は土中1m、年変化は地下20mくらいまでしか達しない。海底は5km深になると、水温は1~4℃と一定しており、したがって大陸より測定が正確といわれる。

大陸における測定値は多くあったが、海洋底は少なかった。しかし大戦後は軍事技術の転用で海洋底での測定が容易になり、むしろ正確でそのデータも増え、世界平均が出せるまでになった。大陸では花崗岩質岩石の下(30~40km)は玄武岩質岩石で、海底では花崗岩質岩石はなく、数百メートルの堆積層の下は玄武岩質とわかった。平均して1.47 HFUで、大陸とは有意の差はなく、むしろ海洋底は低いと予想されたのが逆であった\*28(世界平均は1.50HFUと少し高い<sup>54)61)62a, b)</sup>。各地における測定値を図18, 表17に示した。日本の地下は花崗岩15km, その下に玄武岩15kmとして地殻熱流量の平均は1.55HFUと見積られた<sup>62c)</sup>。

厚い堆積層におおわれた海底では、その生成年代の古いところほどHFU値が小さくなっていく傾向がみられる。海溝と火山帯前線の間の地域は、地殻熱流量は小さく(~1.2より小)、火山帯前線の陸側の火山活動帯では2.2HFUより大きい<sup>62c)</sup>。中央海嶺付近ではきわめて高熱流量で、火山活動の存在を示している\*29。表17の温泉地帯はこれらより大きなHFUである<sup>61)</sup>。

地表で測定する地殻熱流量に対する下部地殻とマントルからの熱量の寄与の割合はどのくらいであるか。たとへばスイス・アルプス中部はモホロヴィッチ層が最も深い場所(~55km)だが、マントルから地殻に入る熱量は0.6HFU、同じようにロッキー山脈東部では0.8HFUであり、地表での熱流量は1.5~1.7HFUではほぼ半分近くである\*30。これが海岸(モホロヴィッチ層40kmで少し浅いが)では、マントルから0.8HFUが流れ込んでくる。

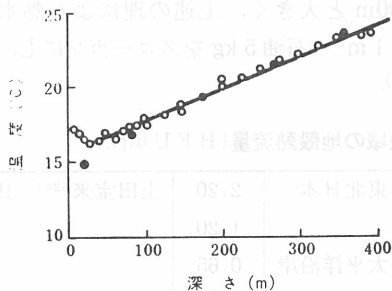


図17 地殻の温度と深度

東大構内深井戸の側壁の温度の測定値(田中館1870年代と上田1957年の値)温度勾配は2.2℃/100m 竹内均; 地球物理学 68p. より

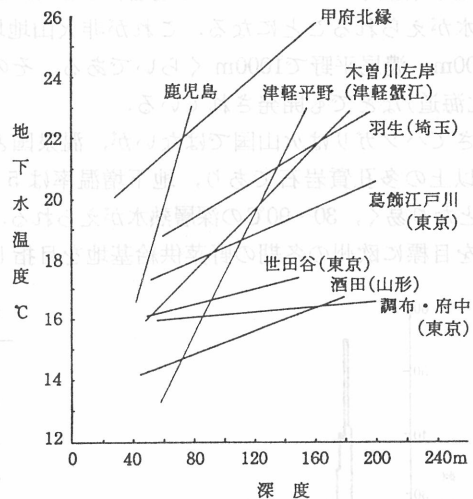


図18 各地の地下水の平均温度と深度

地下増温と関係がある

高橋 稠: 地調報告 第219号(1967年)より作成

\*28 放射性元素は花崗岩質>玄武岩質なので、大陸の方が高いのに予想外であった。これはマントルより熱がくることが対流によると考えられるようになり、海洋拡大の考へ方やプレートテクトニクスの海嶺の存在などの支へととなった。

\*29 アイスランドは温泉、火山、地震が多く、地震、火山の分布が左右対称的であり、山脈もなく、島全体(わが国の1/4くらい)が玄武岩台地で、大西洋中央海嶺の一部があらわれたところが島でないかといわれる。しかしこれには反対もある<sup>62b)</sup>。

$$Q_c = 4.0 \quad Q_t = 1.1(\text{火山噴出物}) + 0.8(\text{熱水, 水蒸気}) \mu \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$$

物質移動による $Q_t$ の大きいのが注目される。火山は日本といわれるが、過去50年では $Q$ はアイスランドの1/7, 第4紀全期間を通じてもその数十分の一にすぎない。

\*30 米国西部のBasin and Range 地区で放射性起源の熱発生量は $15 \times 10^{-13} \text{ cal m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ で、地表近くの熱流量は $1.6 \times 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ なので~4kmで200℃となる。米国東部のある地域では地表の熱流量が上記の半分であり、放射性起源の熱発生量は同じであるとき約9kmの深さで200℃となる。

わが国では花崗岩(47試料)玄武岩(7試料)のUの2.66, 0.63, Thの11.7, 2.66 ppm, Kの2.14, 1.05%より, 上記にならひ両岩質層を15kmとすると, 地殻にある放射性元素による発熱量はそれぞれ0.64, 0.18HFUで, 地殻発熱量の53%にあたること示された<sup>63)</sup>.

これらの例でみる如く, 大陸では地殻熱流量の約50%は地殻にある放射性元素の崩壊によるものと考へてよい. 大陸は地球表面の1/3なので, 全地殻熱流量の15%は地殻にある放射性元素によるとみられる<sup>64)</sup>.

前回地球にあるU, Th量の評価は一致しているが, あわないKを低い方の170ppm(表3)とする<sup>7)</sup>と, 地殻熱流量にはたりず, 地球は冷える結果となる. 高い方のコンドライト隕石の800ppmをとる<sup>6)</sup>\*31と, 地殻熱流量とほとんど一致し, 地球は温かくなるとのべた. 地球のKが隕石とくらべてなぜ小さいかがわからないと適否の判定はできないが, まづ地殻熱流量の100%ではないにしても60%は放射性元素でまかなへることになる<sup>64)</sup>.

地殻熱流量 $1.5 \times 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (1.5HFU)は熱量としてはわづかだが, 1年では $2.5 \times 10^{20} \text{ cal}$ となる. 地球では $10^6 \sim 10^8$ 年という長い時間の寄与があるので莫大なエネルギー量となる. いま岩石の熱伝導率を $K = 5.4 \times 10^{-3} \text{ cal cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ degC}^{-1}$ とすると, 温度勾配 $dT/dx$ は前式より,

$$1.5 \times 10^{-6} / 5.4 \times 10^{-3} = 0.28 \times 10^{-3} \text{ degC cm}^{-1} = 28^\circ\text{C/km}$$

で, まさに地下増温率として実測しているものである.

地下増温率が $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ の場合, 2000mで $60^\circ\text{C}$ となり, 地表面の温度を $15^\circ\text{C}$ とすると $75^\circ\text{C}$ の熱水がえられることになる. これが非火山地域の深層熱水であり<sup>61)</sup>, その利用例は関東地方で2000m, 濃尾平野で1000mくらいである. その他和田(秋田), 長岡(新潟), 上北(青森), 苫小牧(北海道)などでも開発されている.

さてハンガリは火山国ではないが, 温泉国として有名である. 中央盆地内の堆積層は空隙率10%以上の多孔質岩石であり, 地下増温率は $5 \sim 7^\circ\text{C}/100\text{m}$ と大きく, 上述の理により熱水貯溜層となり易く,  $30 \sim 90^\circ\text{C}$ の深層熱水がえられる.  $60^\circ\text{C}$ 温水  $1 \text{ m}^3 = \text{石油 } 5 \text{ kg}$ をスローガンにし, 1990年を目標に欧州の冬期の野菜供給基地を目指している<sup>65)</sup>.

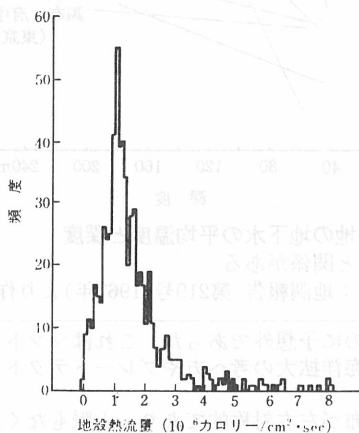


図19 地殻熱流量の頻度分布(HFU単位)  
平均は1.5HFU, 高い地点は少ないが広く分布している.  
竹内均; 地球物理学 69p.より

表17 各地域の地殻熱流量(HFU単位)

日本海側, 東北日本	2.20	上田宝来 <sup>62c)</sup> 1964
西南日本	1.20	
東北日本の太平洋沿岸	0.65	
北海道 登別地獄谷	2,780	福富 <sup>61)</sup> 1961
定山溪	60	
川湯	119	
湯の川	71	
弟子屈	320	
濁川	63	
その他 松川	15.0	その他 <sup>62)</sup>
草津白根	10.8	
東京	0.74	
尾去沢	2.24	

\*31 コンドライト隕石の値でこれを用いて地球全表面で積分すると, 地球がコンドライト隕石からできたとしたときの全熱量と一致することがわかり, 隕石生因説がとられた(I-8参照).

## 16 地熱貯溜層と温泉の形成

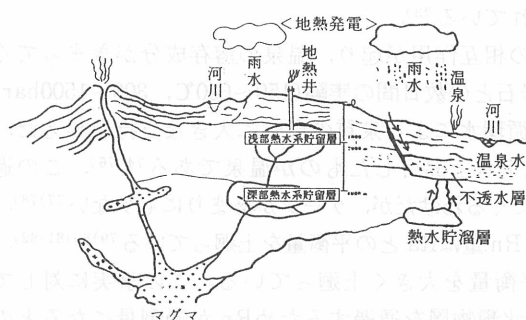


図20 熱水系貯溜層の存在(想像図)

地震学や地球磁気学の研究からマグマ溜りは3~12kmといわれている。マグマ中のある範囲内に流入してきた地下水が熱伝導又は水など揮発成分であたためられると、定常的に上昇し温泉になる。この場合にマグマ溜りの上面温度を900℃とし、温度勾配、湧出量、水温を計算した結果と実測した熱階級とはよい対応<sup>\*34</sup>をしている<sup>61)66)</sup>。熱階級V(熱エネルギー  $10^{8.5} \text{ cal min}^{-1}$ )以上の温泉数は全温泉の5%にすぎないが、わが国の全温泉の総エネルギー量の50%にあたり、その形成にはマグマ溜りで熱せられた熱水の混入がないと成立しえないといわれる。

従来の温泉は200~300m深度止まりだが、最近の地熱開発にともない2~3km深度の情報えられるに至った結果、地下深部の熱水の化学的性質、成因、またマグマ発散物の分化現象などと温泉形成論が次第に判然としてきた。

その成因に大きなインパクトを与えたのは、放射能に始まる原子力時代の恩恵である酸素、水素の同位体の測定である。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{\text{D}}$ の測定によると<sup>\*35</sup>、温泉の大部分は循環水で<sup>67)</sup>、マグマ起源の水はごくわずかで5~10%をこえてはいない<sup>\*36</sup>。 $^3\text{H}$ ( $\beta^-$ , 12.3年)は宇宙線起源で、成層圏で $^{14}\text{N}$ ( $n, ^3\text{H}$ ) $^{12}\text{C}$ 反応ででき、水のトレーサーとなり、水の年齢がはかれる<sup>68)</sup>。八丁原地区の地熱井で18年<sup>69)</sup>26年<sup>70)</sup>などのほか、濃尾平野の非火山性温泉<sup>71)</sup>では36年、50年以上などとわかった。

マグマ溜りと地熱貯溜層の関係が地熱開発と共に判然としてきた。岩石や地層は数%くらいの空隙があり<sup>\*37</sup>、さらに割れ目、断層、破碎帯などがあり、ときには数十%に達し、ここに熱水

\*32 本邦の全温泉地域から放出される総熱エネルギー量 $Q$ として、 $1.1 \times 10^9 \text{ cal s}^{-1} = 6.6 \times 10^{10} \text{ cal min}^{-1} = 3.5 \times 10^{16} \text{ J y}^{-1} = 1.5 \times 10^{24} \text{ erg y}^{-1}$ を見積った<sup>61)</sup>。地殻熱流量 $Q_c$ ( $1.2 \sim 1.5 \text{ HFU}$ )として本邦全陸地で $4.3 \sim 5.4 \times 10^9 \text{ cal s}^{-1}$ となり、 $Q/Q_c = 0.30 \sim 0.20$ にすぎない。

\*33 地表から25kmまで花崗岩質(密度2.7)玄武岩質(密度3.0)は25~35kmと地震波から推定されるとして、地表から $1 \text{ cm}^2$ の断面積のこれらの岩石の柱を考へて、JacobとAllanの $^{235}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ のデータを引用し、その発熱量は $1.21 \text{ HFU}$ になるという<sup>61)</sup>。したがって温泉地はこれ以外の熱源を必要とすることになる。

\*34 熱階級の分類と温泉形成に必要なマグマ溜りの生成条件などの見地から、わが国の温泉は第4紀火成岩を熱源とするもの86%、新第3紀火成岩を熱源とするもの3%、残り10%は非火山性の温泉であるという結果をえている。熱階級Vは大湧谷(神奈川)、玉川(秋田)、別府(大分)、小浜(長崎)、登別、川湯、定山溪(北海道)などで、いずれも第4紀火山帯にある<sup>61)</sup>。

\*35 マグマ水は $\delta^{\text{D}} -60 \sim -80\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} +6 \sim +8\%$ と推定されている<sup>67)</sup>。 $\delta^{\text{D}} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10(\%)$ の関係がある。高緯度地方ほど軽い水が多くなることが知られている。

\*36 熱収支からしらべた結果によると別府で約7%、箱根はおよそ5%がマグマ起源の水といわれるのと一致している<sup>61)</sup>。

\*37 温泉水がその地表水より $\delta^{18}\text{O}$ が大きい(oxygen shift)のは、岩石( $\delta^{18}\text{O} + 5 \sim +10\%$ )と水との交換反応の結果であり、相互作用を表す目安となる。

$\delta^{\text{D}} - \delta^{18}\text{O}$ 図から温泉を形成する初生水の存在が推定されるがみつかった例はない。

が入りうる。すなわち蒸気を含む状態になると動粘性が増し、流動性が悪くなり、したがってある種の地層は十分に熱水貯溜層になる<sup>72)</sup>。最近ではgeothermal reservoir engineeringの考えが進展し、種々のモデルでその性格づけがおこなわれている<sup>73)</sup>。

貯溜層の中では高温高圧の地熱流体と岩石との相互作用が起り、温泉の溶存成分がきまってくる(主として陽イオンだが)<sup>74)</sup>。これは実験室の岩石との数日間の実験(150~600℃, 300~1500bar)で、火山性温泉組成の水をえたことにより<sup>75)</sup>、循環水による泉質の形成に大きな支持を与えた。

この貯溜層から上昇した熱水が地表近くで地下水と混合したものが温泉である<sup>74)76)</sup>。この過程で温泉水に溶存する放射性元素の性格もきまってくるわけだが、データがあまりにも少ない<sup>77)78)</sup>。比較的データの多いRnとRaについて<sup>79)</sup>みると、Rn量はRaとの平衡量を上廻っている<sup>79)80)81)82)</sup>。

地熱水でも表18に示した如くRnはRaとの平衡量を大きく上廻っている。この事実に対しては(図21)、放射能泉の場合に地表近くで放射性沈澱物層を通過するためRnが過剰量になるとの説明がなされたが、この適用はこれらではあてはまらない<sup>80)</sup>。

表18 地熱井ガス熱水中のRa, Rn例(大岳, 八丁原)

源泉	深さ	孔底温度	Rn pCi l <sup>-1</sup>		Ra pCi l <sup>-1</sup> ガス組成%(Vol.)					
			非凝縮ガス	凝縮水	熱水	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
大岳No.8	346m	190℃	混合	4,256	286.2*	3.04	87.4	0.7	11.0	0.9
No.9	550	150				2.71				
No.10	600	183				2.22				
八丁原No.4				375	21.4**	3.03	59.4	4.9	34.8	0.9

\* 非凝縮ガスと凝縮水の体積比 1 : 1.06,

\*\* 同じく 1 : 1.3(27~28℃)

わが国の地熱調査報告によると<sup>83)</sup>、60℃以上の源泉数は867あり、Rnの定量されたものは310源泉ある。この平均値を出すと663pCi l<sup>-1</sup>となり<sup>82)</sup>、この平衡量のRaを出すときわめて大きな数値となる\*<sup>38)</sup>。外国の定量例にくらべると2~3桁は小さい。米国の温泉でもRaの24pCi l<sup>-1</sup>に対し、Rnは17,570pCi l<sup>-1</sup>と、やはり大きく平衡量を上廻っている。

マグマに関係深い火山、噴気、温泉ガス中のRn, Tnについて広汎な長期にわたる研究がある<sup>84)</sup>。温度が低いガスほどRnの量が多く、しかも上記の地熱水よりぐんと大きな含量である(表19)。これらのRaの定量値はないが、ラドンが地表近くでこのように多い事は、つぎにのべるような地下水の混入が一つの大きな要因と筆者は考えている。

さて上記の地熱井は詳しくしらべられており、地熱貯溜層での岩石との相互作用で、陽イオンの溶出が起り、深度が深いと酸性の熱水だが、次第に中性、アルカリ性にかわることもわかっており、また液性変化に応じて石膏の沈積も起っていることなども知られている<sup>85)</sup>。したがってRaの共沈減少もあるかもしれないが、9個の地熱井のRaは0.58~2.17pCi l<sup>-1</sup>であった。熱水にともない表18のようなRnの過剰量が存在している。このRnの過剰量の存在を、“Rn”地下水が地表近くでの混入によると説明した<sup>80)</sup>。しかしまだ“Rn”地下水の実在の証明はなされていない。

つぎに溶存している微量成分の定量についてだが、Cu, Znについては比較的多い。しかし温泉形成の過程を考えるとhydrothermalを考慮した成分の定量値が欲しい。東太平洋海嶺の海

\*<sup>38)</sup> 温泉法ではラドン2000 pCi kg<sup>-1</sup>以上、ラジウムとして10 pCi kg<sup>-1</sup>以上含むものを鉱泉といい、ラドン300 pCi kg<sup>-1</sup>以上のものを療養泉で放射能泉としている。ラジウムが100 pCi l<sup>-1</sup>をこへるものは全温泉中5.2%にすぎない<sup>79)</sup>。

底噴出<sup>86a)</sup>(図22)<sup>88)</sup>やマンガン、銅などの鉱床形成が知られて<sup>\*39, 87)</sup>き、また黒物鉱床との関連も問題になってきているだけにその感が深い。図15にこれらの元素をあげた<sup>\*40)</sup>。またU, Thの崩壊生成物の<sup>206</sup>Pbなどと鉛の進化の問題<sup>\*41)</sup>や黒鉱との関連に<sup>88b)90)</sup>興味深いものがあるが割愛せざるをえない。

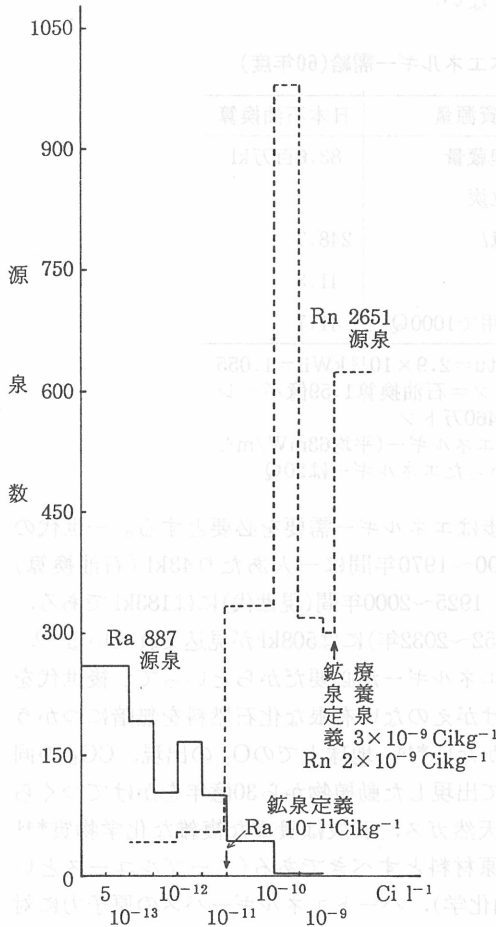


図21 温泉中のRaとRnの頻度分布(日本)  
堀内公子：温泉科学，31 69～78 (1981)より<sup>79)</sup>  
作成

表19 火山ガス，噴気ガス，温泉ガス中のRn濃度

種類	例数	ラドン濃度
火山ガス	46	* $1.39 \times 10^{-9} \text{ Ci l}^{-1}$
噴気ガス	55	8.31 "
温泉ガス (>90℃)	48	17.57 "

\* または1390 pCi l<sup>-1</sup>と示せる。

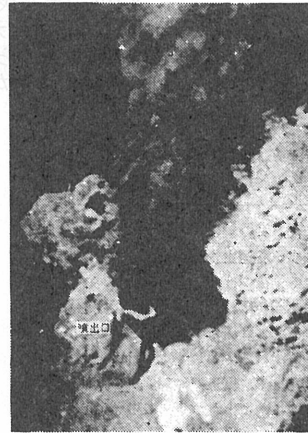


図22 南太平洋海嶺の北緯21°地点の海底からの熱水の噴出状況<sup>\*\*40)</sup>  
深度2700mで270気圧 450℃で水の臨界点(225.7気圧, 374.4℃)をこえている(米国ウツホール海洋研究所R. Ballard博士)  
自然1980年5号36p.より<sup>88)</sup>

### 17 天与の熱エネルギーの利用

エネルギー資源の約90%を海外にたよっているわが国は問題を蔵しつつも原子力を選択した。一次二次の石油ショックの苦悩を味わい、国産エネルギー源として地熱をソフトエネルギーパスの一つとしてえらんだ。プレートテクトニクスによればわが国は地熱に恵まれた島弧であるが、1966年松川地熱発電所(2万kW)の開始以来、9発電所23万kWにすぎない。地熱発電所は大き

\*39 鹿児島大理鎌田研究室，慶応大工橋本(芳)研究室，広島大理山本(勇)研究室で，地熱水中のAs, Sbの比較分析をおこなった意義は大きい。「地熱流体の化学」100頁参照(文献 69)  
\*40 東太平洋海嶺，ガラパゴス海嶺などで深海潜水調査により熱水作用，およびこれにともなう鉱化作用がみつまっている<sup>88)</sup>。ガラパゴス海嶺付近の堆積物中では熱水関係として，Li, Be, K, Mg, Ca, Si, Al, Mn, Ti, V, Cr, Co, Ni, Zn, Mo, Pbがしらべられた<sup>89)</sup>。  
\*41 黒物鉱床を形成した鉛は外帯のものほど放射性起源鉛(<sup>206</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb)が多いという。

くても5万kWにすぎず\*42, 多量のAs, S化合物(酸性雨)などの処理, 熱水還元, 腐蝕問題, 環境問題などと多々問題がある<sup>91)</sup>. またいづれも国立公園内にあり, 両者相互に相入れない問題をかかえている<sup>92)</sup>.

わが国のエネルギー供給構造の実績(総合計438.8百万kl, 60年度通産省)を表20に示したが, 地熱を含めた新エネルギーは全部で1.8百万klにすぎない.

表20 世界のエネルギー資源と日本エネルギー需給(60年度)

資源	エネルギー資源量	日本石油換算
石炭	15~17Q 可採埋蔵量	83.6百万kl
〃	4 低品位炭	
石油	12 3200億l	248.7
天然ガス	6	41.3
ウラン(原子力)	2 Pu使用で1000Q	41.7

換算: エネルギー単位 1 Q = 10<sup>8</sup> Btu = 2.9 × 10<sup>12</sup> kWh = 1.055 × 10<sup>21</sup> J = 石炭換算3400万トン = 石油換算1.59億バレル(≡159 l) = 天然ガス換算6460万トン

参考: 地球全表面から放出される熱エネルギー(平均63mW/m<sup>2</sup>)は1 Q, 人類が有史以来つかったエネルギーは20Q

表21 2010年におけるソフトエネルギー構成<sup>93)</sup>

自然エネルギー	4 mQ	
内訳		
水力発電	2 mQ	50%
地熱発電	0.7	18
風力発電	0.002	0.05
太陽熱	0.4	10
海洋		
バイオマス	0.2	5
その他	約1	25

必要とする一次エネルギー総量40mQの10%にあたる. Qの1/1000がmQ単位である.

文明の進歩はエネルギー需要を必要とする。一世代の必要量は1900~1970年間は一人あたり43kl(石油換算)であったが, 1925~2000年間(現世代)には183klである。次の世代(1952~2032年)には508klが見込まれている<sup>93)</sup>. このようにエネルギーが必要だからといって, 後世代を考えずにかげがえのない有限な化石燃料を無暗につかうわけにはいかない\*43. 地球上でのO<sub>2</sub>の出現, CO<sub>2</sub>の同化作用をへて出現した動植物から30億年をかけてつくられた石油, 天然ガス, 石炭は貴重な複雑な化学物質\*44で他物質の原材料とすべきである(ノーブルユースという, 例 石油化学). ハードエネルギーパスの原子力に対し, 地熱をエネルギーパスの一つとしてえらんだが, 多くは期待できない(表21)\*45.

温泉のエネルギーを平均温度52℃, 気温15℃として石油換算量で出してみると, 1985年は5.99百万klにあたり, 年間石油輸入量の約0.02%弱の節約になる. これは有効に全熱量(15℃まで)を用いての話である. しかし実情をみると1978年には湧出量約240万トン/日の中170万トン/日を入浴につかうとしても, 70万トン/日が未利用という

\*42 世界としても1981年249万kW, 82年256万kW, 83年319万kW, 84年458万kWといった設備容量の伸びである. 5万kWには100トン/時の蒸気生産井が5~10本いる. 生産井は年6~10%減衰する. 地下水量の減少のためであろう.

\*43 石油代替は原子力開発と共に代替エネルギー開発を目指したサンシャイン計画により, また省エネルギー計画にはムーンライト計画がある. 2020年には総エネルギー需要の10%を目標にしている.

\*44 一人あたりのエネルギー消費量は米国の1/3以下, GNPあたりで1/2以下である.

\*45 わが国は1980年電力需給量の66%を化石燃料でまかなっており, 原子力発電は10%になった. したがって日本は原子力発電設備を増やして石油火力をへらすべきであると, 先進各国よりの圧力となっている.

状態<sup>94)</sup>である。

さて地熱の利用形態が、直ちに地熱発電とつながるのは全く能率の悪い話である。すなわち熱水の最高温度は250~270℃、一次蒸気が147℃(3.5kg/cm<sup>2</sup>)くらいであり<sup>95)</sup>、熱機関としては本質的に効率が悪い\*46)のである。消費地からエネルギー源が離れているところが本質的な問題点である。熱の有効利用でエネルギー密度の低い流体の長距離輸送も問題だが(ケミカルヒートパイプなどの新技術もある)、地熱発電にこだわるとハードエネルギーパスに近づいてしまう。普遍的なローカルエネルギー源としての特性を発揮する方が大切であろう。いまや原子力発電さえ\*47)プロセスヒート、地域暖房の傾向を強めつつある情勢である。

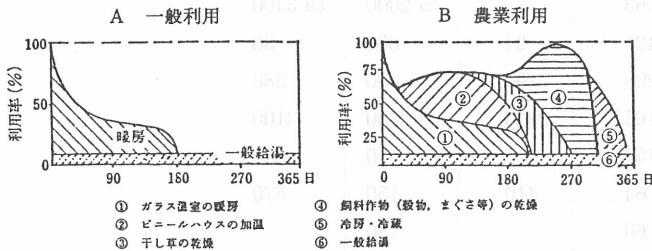


図23 熱水の年間利用率  
地熱流体の化学 203p (1985)

プロセスヒートとしての利用は物や工程に応じて広い温度範囲があり(表23)、利用形態の組合せをもう一度考えるべきであろう。浴用と暖房だけでは不十分で、ハンガリの例のように季節需要を平均しなくては利用形態としては不十分である(図23)。

この点では工業利用の方が需要に季節的変動は少なくよい。

このような点からは非火山性温泉の利用の方が工業立地にも近く消費地も近く、多くの優位性が予想されよう。温泉から与えられる熱エネルギーを真に有効に利用することこそ、省エネルギーになるだけでなく国産エネルギーの創生にならう。

従来の量的な概念が優先するハードエネルギーパス(火力、原子力など)に対して、必要とする質のエネルギーに応じて再生可能な自然エネルギーの充当ができることこそ、分散的で安定性の高いソフトエネルギーパスの本領である\*48)。前者が拡大と共に生産コストが上がるのに、後者は逆に低コストになっていく可能性を持っている。

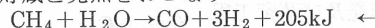
放射能は自然、人とは無関係に固有の速度(半減期)で熱エネルギーを人類に与えている。それに答える人類の英智の結集がなければ無駄に流れさってしまうのが宇宙の真理の教えるところである。島弧日本にとってこの熱エネルギーこそ、石油石炭にかわるまさに神の恵みと感謝すべきであろう。表24をみるとその感きわめて大きく、あらためてその大きさと意義を再認識したい。

\*46 軽水炉の基準は熱出力310万kW、電気出力100万kW (e)であり、送電力は73万kWで27万kWは発電所サイト分である。熱排水は210万kW分で68%にあたる。年間60億kWhである。このため反対派は原子力排熱所だといっている。

蒸気を取り出しタービンをまわして発電するわけで、原子炉で高温を発生させ蒸気を取り出すところを地熱がするわけである。

原子力発電で熱効率は32%で、地熱発電では20%前後といわれる。石油火力による電気を用地暖をとると、石油ストーブで暖をとるとの効率の差異は明らかであろう。

ドイツユーリッヒ原子力研究所では、高温ガス原子炉で熱を吸収し→方向の吸熱反応をおこなわせ、CO、H<sub>2</sub>としてパイプでエネルギーをはこび、住宅で触媒を用いて←方向の反応をおこなわせ地域暖房としている。熱の貯蔵と発熱をおこなう。



\*47 得られた電気を遠方へはこんでいるのが現状である。電気にして熱源にしているが、原子炉周辺の市町村にもっと積極的に暖房、温湯を供給することの方が、安全性と住民との理解がえられる一つの方途と考えている。最近では原子炉の大型化をさげ小型化の傾向がみられる。

\*48 ソフトエネルギーパスは再生可能な自然エネルギーをさし(A. ロビンソン, OEEC 報告 1960年)、バイオマス、風力、水力、太陽電池などすべて太陽エネルギーにつながっている。地熱発電も循環水がきわめて重要な要素であり、間接には太陽エネルギーにつながっている。スケールメリットを求め、大型化した化石燃料はハードエネルギーパスの代表であり、使用後は回収不可能である。資源エネルギーという人もある。



放射能に関係して仕事をしてきた一人として、宇宙の創生、地球の誕生と進化、火山、地熱そして温泉へと、先人の業績をこの立場で解釈して一つの新しい一貫した見方をして、一つのシナリオをつづけてきた。もちろん誤りなきよう努力してきたが、さらに多くの人により誤りを正し、定量的にして展開されていく素材となることを期待している。

表22 各国の地熱開発計画

地熱発電 主要国	既 設		計 画	
	発 電 MW(e)	熱利用 MW(t) <sup>b</sup>	発 電 MW(e)	熱利用 MW(t) <sup>b</sup>
米 国	663	17	ca 2000	ca 3400
イ タ リ ー	421	24	800	38
ニュージーランド	203	196	400	380
日 本	165	2900	ca 2000	3100
メ キ シ コ	150		150	680
アイスランド	64	410	150	570
エルサルバドル	60		180	
ソ 連	5	4860	?	?
フィリピン	4.2	4.9	765	?
台 湾	1	0.6	?	5
ト ル コ	0.5	0.2	400	?

Geothermal Energy 11, 783 (1978)

表23 温泉の温度と利用例

利用形態と種類	利用例と温度℃
A 一般利用 蒸気または熱水 → <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 治療</li> <li>→ 浴温, 浴用</li> <li>→ レクリエーション</li> <li>→ 健康・観光産業</li> <li>→ 融雪・凍結防止</li> </ul>	
B 農業関連業 蒸気または熱水 → <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 露地農業</li> <li>→ 施設農業</li> <li>→ 農産物加工業</li> <li>→ 保冷保温貯蔵</li> <li>→ 畜 産 業</li> <li>→ 林 産 業</li> <li>→ 水 産 業</li> </ul>	食品工業 冷凍乾燥 ≥180℃ 罐詰 140 砂糖精製 130 乾燥食品 120~140
C 工業用利用 プロセス ヒーティング → 抽出, 蒸溜 → <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 予熱工程</li> <li>→ 洗浄工程</li> <li>→ 剥皮及び漂泊工程</li> <li>→ 蒸発及び蒸留工程</li> <li>→ 殺菌工程</li> <li>→ 乾燥工程</li> <li>→ 冷凍工程</li> <li>→ 熱処理工程</li> <li>→ 蒸煮工程</li> <li>→ 濃縮工程</li> </ul>	石油精製 125~150(40%) 150~175(40%) 175~250(20%) 化学工業 塩素-NaOH(隔膜セル) ソーダ灰 >120 バイヤー法 Alの製造 >150 重水(H <sub>2</sub> Sイオン交換) 170 フラッシュ法のS採取 ≥120

表24 1hgの熱エネルギーの比較\*

エネルギー源	発熱量	備考
平均温度 不感温度 温泉 52~37°C, 1l	15kCal*	*鶏舎, 畜舎暖房, 土壌(ミミズ養殖), ハウス暖房(野菜, イチゴ, 花)25°C前後
平均気温 52~15°C, 1l	37**	養殖, し尿処理, 醸造, 消雪融雪
石炭 1kg	700	10~15%灰分
原油 1kg	10,180	1lは9400kCal
LNG 1kg	13,300	
TNT火薬 1kg	1000	
<sup>235</sup> U核分裂 1kg	2100万	
<sup>2</sup> H核融合 1kg	8400万	
馬 1馬力	746W	HP(英米)仏独は1馬力(PS)は735.5Wである. 計量法はこれを用いる. 人間の10倍である.

\* 電力1kWhは860kCalにあたる. 熱効率35.1%として発電には2450kCalがいる. 1990年エネルギー需要は4.6億klで地熱は150万kl(0.3%)で, 国産石油が15万klである(資源エネルギー庁統計, 58年11月). 54年8月, 57年4月の暫定見通しでは, 地熱は0.07, 0.06%で, エネルギー総需要はそれぞれ7.0, 5.9億klであった.

\*\* 温泉: 温泉の他目的利用一覧(1), (2) 52巻8月号, 9月号(1984), 日本温泉学会

## 文 献 (つづき)

(I)にあげたほかに 特に岩波講座地球科学 1地球, 3地球の物質科学, 7火山を種々参考にした. 本文で詳細にしたいときは参照していただきたい. その他数多くあるが, スペースの都合からその一部を下記に引用した.

- 31) R.A. Alpher, H.A. Bethe & G. Gamow, *Phy. Rev.*, **78** 803~810 (1948) ( $\alpha, \beta, \gamma$  理論)
- 32) E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler & F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.*, **29** 547~650 (1957) (B<sup>2</sup>FH 理論)
- 33) 林忠四郎, 早川幸男, 宇宙物理学 第V部 元素の起源 509~580頁, 現代物理学の基礎 11巻, 岩波 (1978年)
- 34) D.D. Clayton, *Phys. Today*, **22** 28~37 (1969); A.G.W. Cameron, *Nuclear Astrophysics Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **8** 299~326 (1958); Joel Selbin, *J. Chem. Edu.*, **50** 306~311 (1973); **50** 380~387 (1973)
- 35) 日本物理学会, 地球の物理, 現代の地球観 3章 57~88 (1982) 丸善
- 36) 斉藤国治, 飛鳥時代の天文学, 84p 河出書房新社 (1982)
- 37) 石田五郎他5氏, かに星雲の話—超新星の爆発, 197頁 中央公論社 (1973)
- 38) G. Friedlander, J.K. Kennedy, Julian Malcolm Miller, *Nuclear and Radiochemistry* 2nd ed. 515~518 (1964)
- 39) R.J. Tayler, *The Origin of the Elements*, 邦訳, 元素の起源 186頁, 共立出版K.K. (1975), (附)科学, 特集 宇宙の誕生と天体の形成, **55** No.10 (1985)
- 40) 北野 康, 地球環境の化学, 10~13頁, 裳華房 1984
- 41) E. Anders & M. Ebihara, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46** 2363~2380 (1982)
- 42) 松井義人, 坂野昇平, 地球の物質科学 III, 277~281頁, 地球科学4, 1979, 岩波

- 43) I.B. Lambert & K.S. Heier, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31** 377~390 (1967)
- 44) G.R. Tilton, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19** 321~329 (1973)
- 45) S.P. Clark Jr. et al, *Handbook of Physical Constants Rev. ed.* 527~541 (1966)
- 46) K.S. Heier & J.J.W. Rogers, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **27** 137~154 (1963)
- 47) Udo Haack, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62** 360~366 (1983)
- 48) 上田誠也, 水谷 仁, 地球 5章プレートテクトニクスと地球の歴史, 225~304頁, 地球科学 1 1978 岩波; 上田誠也, 杉村 新, 弧状列島 p156, 1970, 岩波
- 49) 久城育夫, 荒牧重雄, 地球の物質科学 II, 4章マグマの起源 93~150頁, 地球科学 3, 1978, 岩波; 同書, 5-2 日本列島におけるマグマの起源 170~181頁, 1978
- 50) C.J. Zablocki et al, *Geophys. Res. Lett.*, **1** 323~326 (1974)
- 51) 久城育夫, 火山, **20** 特別号 259~265 (1975)
- 52) 東京天文台編, 理科年表, 地112, 昭和56年版, 丸善
- 53) L. Brown et al, *Nature*, **299** 718~720 (1982)
- 54) 上田誠也, 水谷 仁, 地球 4章 地球熱学, 169~221頁, 地球科学 1, 1978, 岩波
- 55) John Verhoogen, *Energetics of the Earth* p121~124 National Academy of Science, Washington D.C. 1980
- 56) 上田誠也, 水谷 仁, 地球 300~304頁, 地球科学 1, 1978, 岩波
- 57) R. Bodu et al, *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér D* **275** 1731~1745 (16 October 1972)
- 58) IAEA, *Le Phenomene D'Oklo*, 645p Wien, 1975
- 59) P.K. Kuroda, *J. Chem. Phys.*, **25** 781~782 (1956), *ibid*, **25** 1295~1296 (1956)
- 60) R. Naudet, *Summary Report on the Oklo Phenomenon*, French CEA Rep. Bist No. 193, 7~45 (1974)
- 61) T. Fukutomi, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VII*, **1** 315 (1961); 福富孝治, 温泉科学, **29** 88~102 (1978)
- 62) 上田誠也, 日本の地熱資源, 38~48頁, 地熱調査会, 1970; 中村一明, 宝来帰一, 科学, **41** No.4, 185~198 (1971); S. Uyeda & K. Horai, *J. Geophys. Res.*, **69** 2121~2141 (1964)
- 63) Ysuo Miyake et al, *The Natural Radiation Environment II, Vol. II*, 535~558 (1975)
- 64) John Verhoogen, *Energetics of the Earth*, p26~28 National Academy of Science, Washington D.C. 1980
- 65) 鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田 稔, 地熱流体の化学, 5章 地球の開発, 利用と環境保全, 1985, 東京大学出版会
- 66) 福富孝治, 北大地球物理研究報告, **13** 53~70 (1970)
- 67) Matsubaya et al., *Geochem. J.*, **7** 123~151 (1973), 松葉谷 治, 温泉科学, **31**, 47~56 (1981); H.P. Tayler, *Econ. Geol.*, **69** 843~883 (1974)
- 68) 野口 暁, 村上悠紀雄, 温泉科学, **21** 84~85 (1970)
- 69) 鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田 稔, 地熱流体の化学, 50~51頁 東京大学出版会(1985)
- 70) 真鍋 孝, 江島康彦, 地熱 **21** 101~118 (1984)
- 71) 茶谷邦男他, 地下水誌, **19** No.3, 87~95 (1977)
- 72) 伊藤芳朗, 地球, **5** No.5, 259~267 (1983)
- 73) 湯原浩三, 温泉科学, **34** 134~150 (1984)
- 74) 山下幸三郎, 温泉科学, **35** 20~33 (1984)

- 75) A. J. Ellis & W. A. Mahon, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28** 1323~1357 (1964), *ibid.*, **31** 519~538 (1967)
- 76) 鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田 稔, 地熱流体の化学 1章 序論, 東京大学出版会, 1985
- 77) 土井和巳, 青山安雄, 鉱山地質誌, **5** 35~45 (1973)
- 78) Yasuo Miyake et al, *The Natural Radiation Environment*, 219~225 (1964); 今橋正征 他, 温泉科学, **24** 1~6 (1973), 日化誌, **91** 668~669 (1970)
- 79) 堀内公子, 温泉科学, **31** 69~78 (1981)
- 80) 堀内公子, 村上悠紀雄, 地球科学, **12** 59~70 (1978)
- 81) 御船政明, 温泉科学, **31** 80~93 (1981)
- 82) 石井 忠, 堀内公子, 村上悠紀雄, 温泉科学, **35** 11~19 (1984)
- 83) 比留川 貴, 安藤直行, 角 清愛, 地調報, No.257, 日本の主要地域の熱水の化学組成 (1977)
- 84) I. Iwasaki et al., *Bull. Tokyo Inst. Tech.*, No.47, 11~57 (1962)
- 85) 山下幸三郎, 温泉科学, **21** 26~36 (1970), 大分県温泉調査研究会報告 No.24, 74~81 (1973)
- 86) 酒井 均, 科学, **45** 145~153 (1975); 松葉谷 治 他, 地調月報 **26** 1~11 (1975)
- 87) H. Sakai & O. Matsubaya, *Econ. Geol.*, **69** 974~991 (1974)
- 88) 上田誠也, 自然, No.5, 36~45 (1980); J. B. Corliss, *Science*, **203**, 1073~1083 (1979)
- 89) S. A. Moorby, *Earth Planet Sci. Lett.*, **62** 367~376 (1983)
- 90) 佐藤和郎, 鉱地, **23**, 69~70 (1973); K. Sato & A. Sasaki, *Econ. Geol.*, **68** 547~552 (1973); *Cyamex, Nature*, **257**, 523~528 (1979); K. K. Turekiam et al, *ibid.*, **280**, 385~387 (1979)
- 91) 鎌田政明, 小沢竹二郎, 村上悠紀雄, 吉田 稔, 地熱流体の科学, 4章 地熱利用の環境への影響, 1985, 東京大学出版会
- 92) 田中瑞穂, 温泉科学, **34** 117~120 (1984); 地熱エネルギーと環境保全対策 70頁, 新エネルギー財団, 1981
- 93) 山本賢三, 藤村理人, 世界のエネルギーと原子力問題, 1986, 丸善
- 94) 日本地熱調査会, わが国の地熱発電所設備要覧, 昭和60年版, 137頁, 1985年
- 95) 湯原浩三, 温泉科学, **32** 8~15 (1981)