

GCOE地球たち特別講義6(2012)  
(31D281-1300W)

— 資源・エネルギー —

東京大学・総合文化研究科 小宮 剛

資源・鉱床

(1) 鉱産資源: ベースメタル: 鉄, Mn  
: レアメタル: 白金族,  
希土類元素

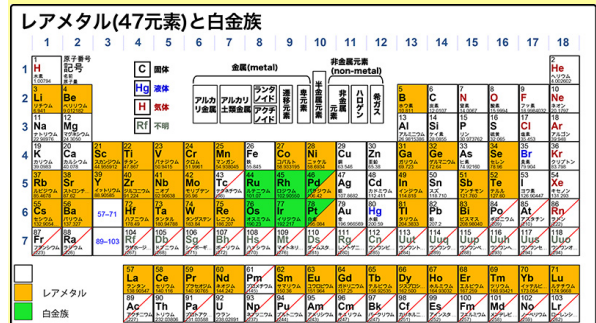
(2) エネルギー: 石油、(石炭)  
天然ガス(メタンハイドレート)

鉱産資源

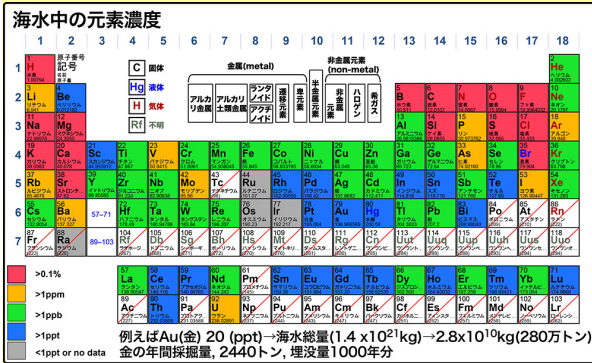
ベースメタル(Fe, Al, Cu, Zn, Pb):  
採掘が容易。埋没量, 生産量が多い。  
精錬が容易。

レアメタル:  
埋没量, 生産量が少ない。  
天然で濃集しない(鉱床にならない)  
精錬が困難。

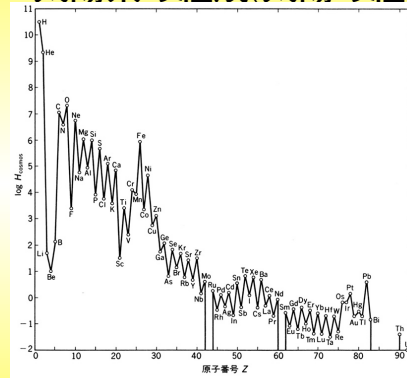
レアメタル: 白金族, 希土類元素



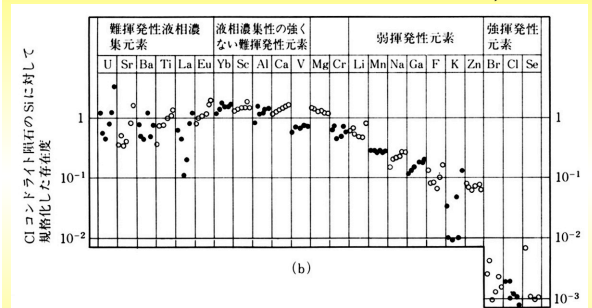
海水中の元素濃度



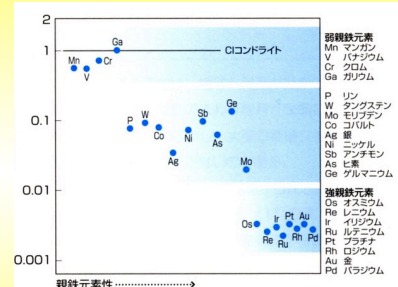
太陽系の組成(太陽の組成)



地球の組成 (揮発性元素)



マントルの組成(親鉄元素)



- ① 親鉄性元素はマントルに少ない
- ② 強親鉄性元素もマントルに含まれる
- ③ 強親鉄性元素濃度は一定

## レアメタルの問題点

寡占状態になり易い  
→地政学問題

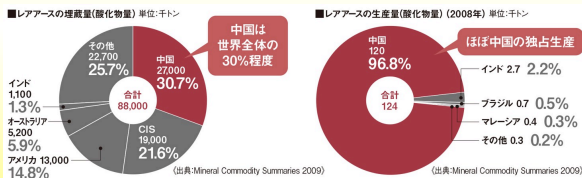
## レアメタルの問題点

○レアメタルは、一般的に希少性や遍在性が高く、輸出国の政策の影響を受けやすいというリスクがある。

	資源の上位産出国(2010年)				上位三カ国の合計シェア	
レアース	①中国	97%	②インド	2%	③ブラジル 0.4%	[99%]
バナジウム	①中国	41%	②南アフリカ	32%	③ロシア 25%	[98%]
タングステン	①中国	91%	②ロシア	2%	③ボリビア 2%	[95%]
白金	①南アフリカ	75%	②ロシア	13%	③シアンハブエ 5%	[93%]
リチウム	①チリ	35%	②豪州	34%	③中国 18%	[87%]
モリブデン	①中国	39%	②米国	25%	③チリ 15%	[79%]
インジウム	①中国	52%	②韓国	14%	③日本 12%	[78%]
コバルト	①コンゴ民	51%	②ザンビア	13%	③中国 7%	[71%]
マンガン	①中国	22%	②豪州	19%	③南アフリカ 17%	[68%]
ニッケル	①ロシア	17%	②インドネシア	15%	③フィリピン 10%	[42%]
鉛	①中国	45%	②豪州	15%	③米国 9%	[69%]
亜鉛	①中国	31%	②豪州	12%	③ペルー 12%	[55%]
銅	①チリ	34%	②ペルー	8%	③中国 7%	[49%]

(出所) Mineral Commodity Summaries 2011 World Metal Statistics 2011 等

## レアメタルの問題点

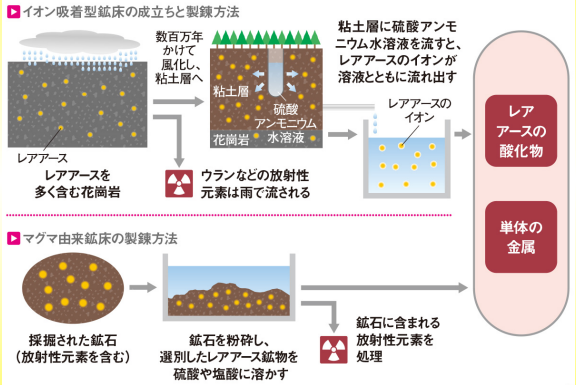


## レアメタルの問題点

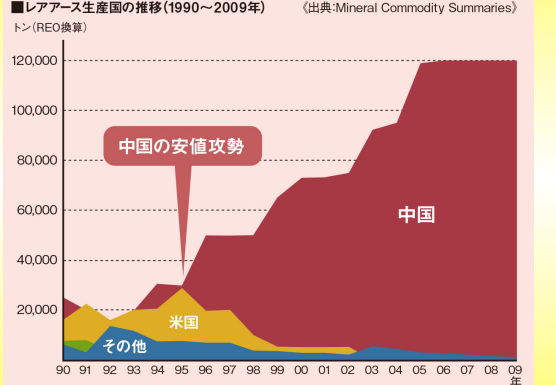
■世界のレアース資源の分布



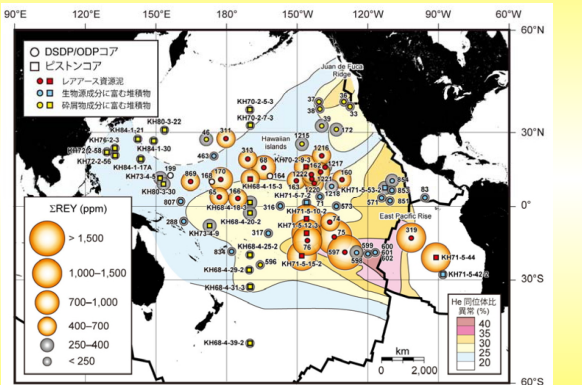
## レアメタルの問題点



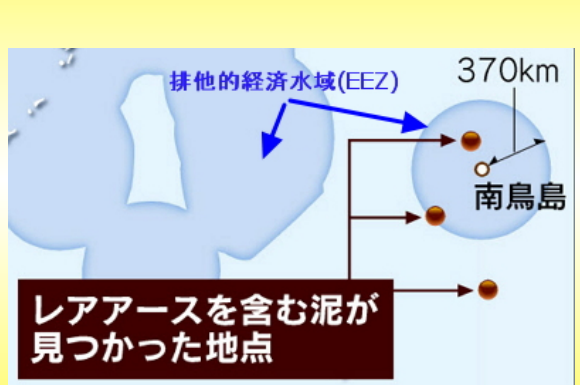
## レアメタルの問題点



## レアースを探せ



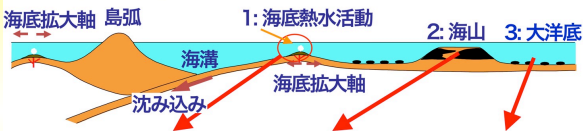
## レアースを探せ





# レアアースを探せ

海洋資源開発 (1) 3つのフィールド



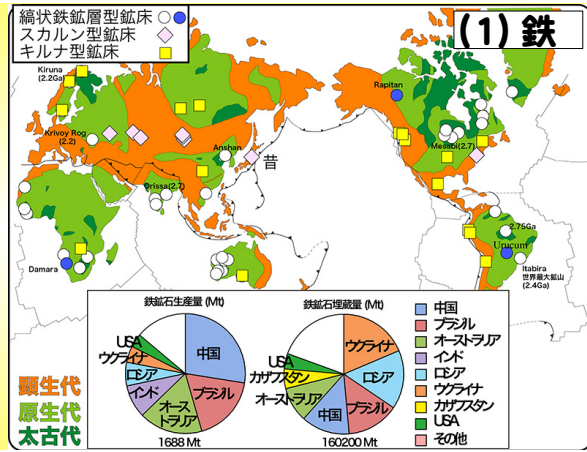
	海底熱水鉱床	コバルトリッチクラスト	レアアース
特徴	海底から噴出する熱水に含まれる金属成分が沈殿してできたもの	海底の岩石を皮殻状に覆う厚さ数mm~1.0数cmのマンガン酸化物	泥状に賦存。陸上の全賦存量に比べ、約500倍の量の存在が見込まれる。
含有する金属	銅、鉛、亜鉛、金、銀やゲルマニウム、カリウム等レアメタル	マンガン、銅、ニッケル、コバルト、白金等	中重希土類元素を含むレアアースを含有
分布する水深	500m~3,000m	1,000m~2,400m	4,000~6,000m

# 成長と限界~地球資源と人口~

(1) 地球の資源(鉱産、エネルギー、木材、環境)  
 ①生物も含め、何にでもほぼ全ての元素が含まれている。  
 ②鉱床(経済的に成り立つ)として採るには、それらの元素が“濃集”させる必要がある(金でさえ3ppm必要)。

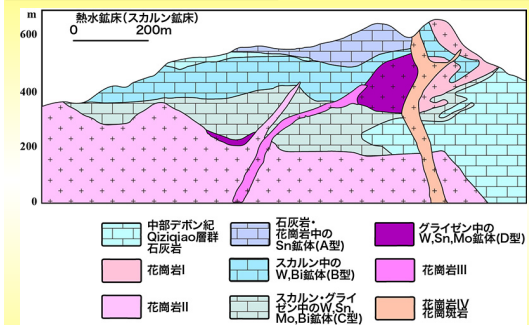
## (2) 鉱床と地球史

- ①形成時期が地球史の特定の時代に限定  
~鉄鉱床, Mn鉱床, 礫岩型金-ウラン鉱床, コマチアイトに伴うNi
- ②形成に長い時間が必要  
~石油、石炭、木材
- ③特定の場所と時期でのみ形成  
~白金(南ア), ダイヤモンド
- ④その他  
~金



# (1) スカルン型

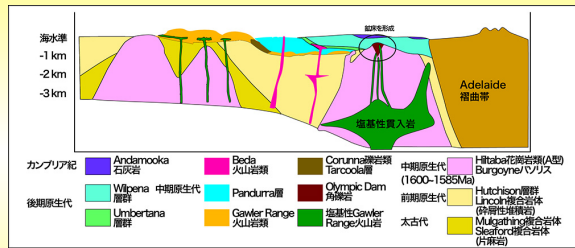
# (1) 鉄



## 石灰岩と火成岩の間での熱水鉱床

# (2) キルナ型

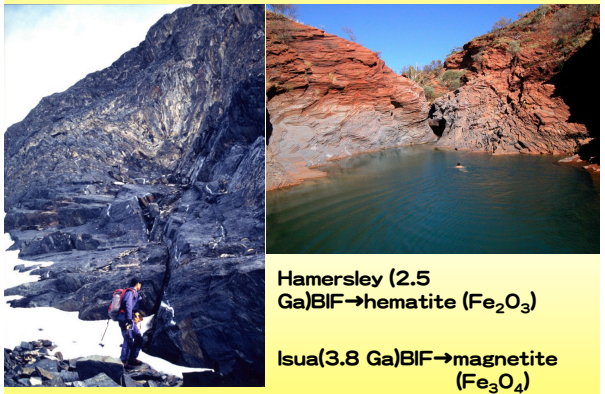
# (1) 鉄



## 堆積岩とアルカリ花崗岩の間での熱水鉱床

# (3) 縞状鉄鉱層型

# (1) 鉄



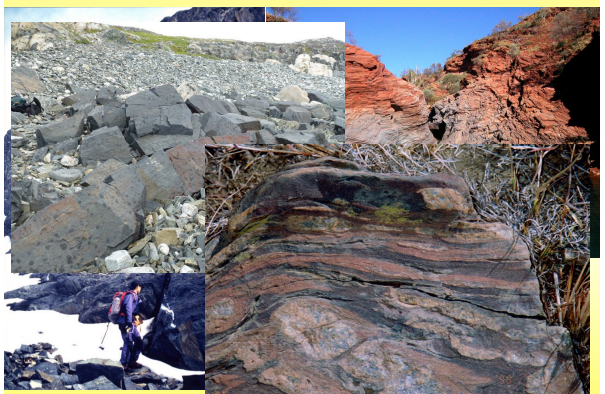
# (3) 縞状鉄鉱層型

# (1) 鉄



# (3) 縞状鉄鉱層型

# (1) 鉄



### 縞状鉄鉱層

25億年前

海水中の $Fe^{2+}$ が酸化されて、 $Fe^{3+}$ になり、沈殿( $Fe_2O_3$ ,  $FeO(OH)$ )

### 縞状マンガン層

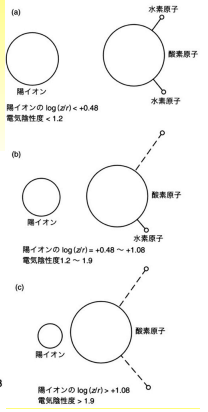
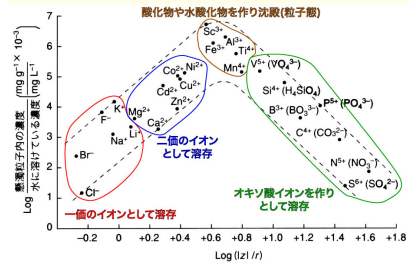
23億年前

海水中の $Mn^{2+}$ が酸化されて、 $Mn^{3+}$ または $Mn^{4+}$ になり、沈殿

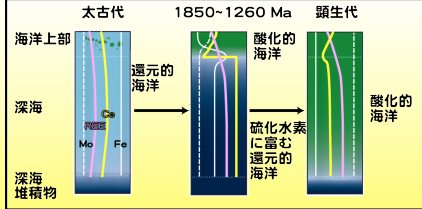
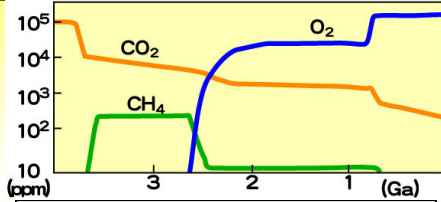


### (1)堆積性鉄床: Fe, Mn, U, Pについて

→水溶液(海水, 河川, 地下水)への溶け易さと、そこからの沈殿

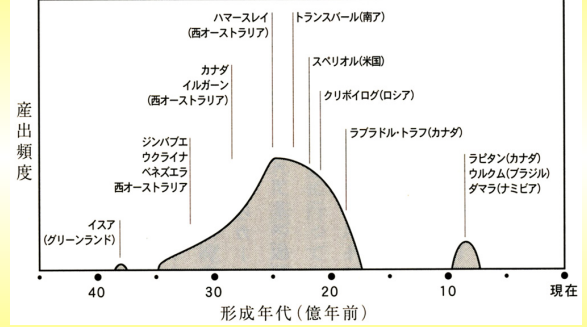


### 大気・海洋の酸素濃度の上昇



### 縞状鉄鉱層と $fO_2$

#### 縞状鉄鉱層とその出現頻度



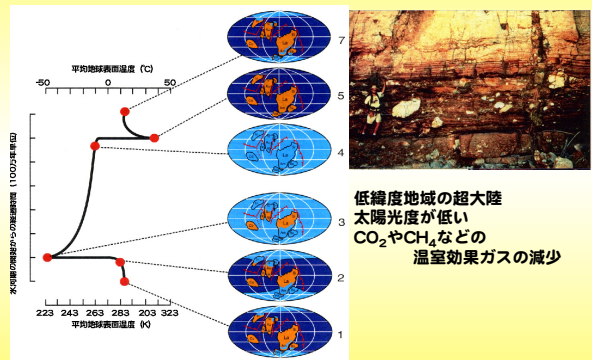
18億年前以降BIFはできない(例外:全球凍結後)

### 地球が全面凍結すると？



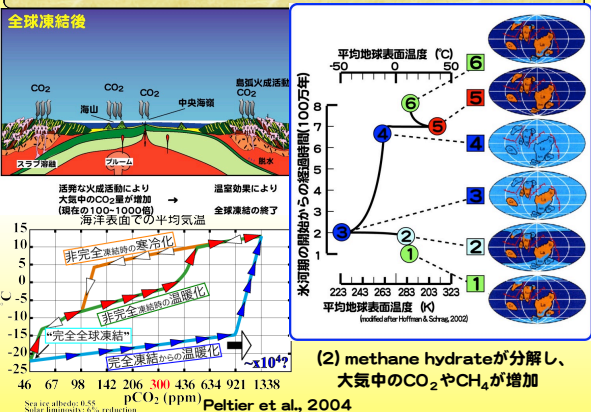
- (1)地球表面での生命活動の停止 → (酸素発生型) 光合成の停止
- 海洋循環の停止 → 海洋の成層化 → 還元的深層水

### 全地球凍結(7.5と6.3, (5.8)億年前)

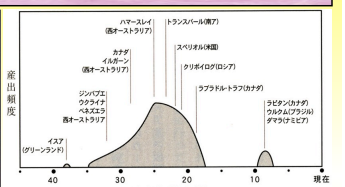
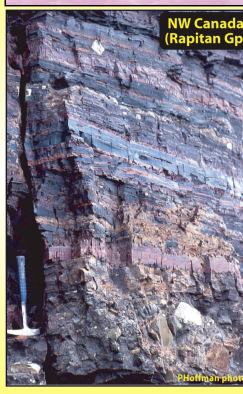


低緯度地域の超大陸 太陽光度が低い  $CO_2$ や $CH_4$ などの温室効果ガスの減少

### 全球凍結



### 全球凍結により海洋循環が停止:縞状鉄鉱層の堆積



還元的な( $Fe^{2+}$ に富む)海水が間欠的に表層近くの酸化的な水と反応すると $Fe^{3+}$ になり、 $Fe(OH)_3$ や $FeO(OH)$ で沈殿

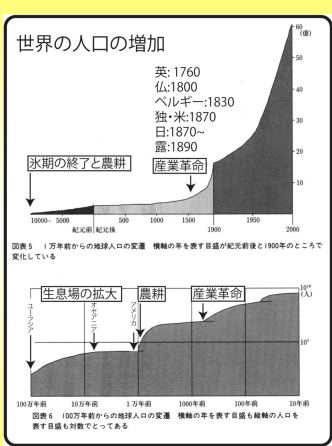


### ⑤-2 地球の人口

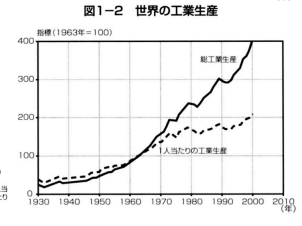
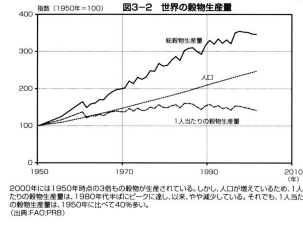
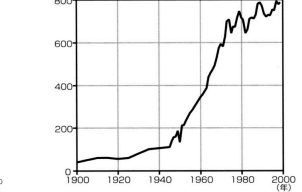
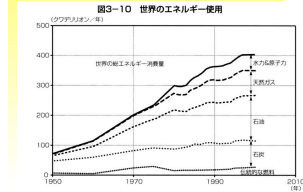
#### 3段階の増加

- ① 生息場の拡大  
(アフリカからユーラシア、オセアニア、アメリカへ)
- ② 農耕の開始
- ③ 産業革命

しかし、  
①②までは基本的にその時点でのエネルギー(太陽)に依存した生活(他の動物同様)。一自然に影響されやすい  
③において、化石燃料(過去の地球で蓄積されたエネルギーを使うようになる)人間圏の形成

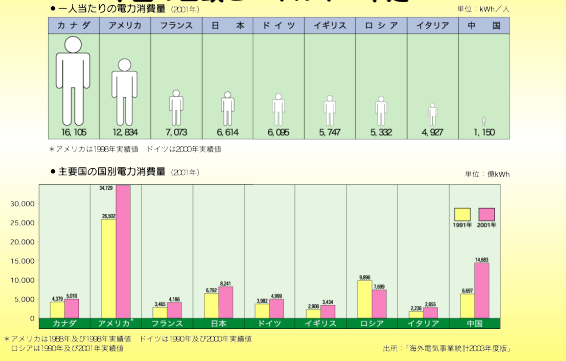


### (6-1)消費量と生産量の推移

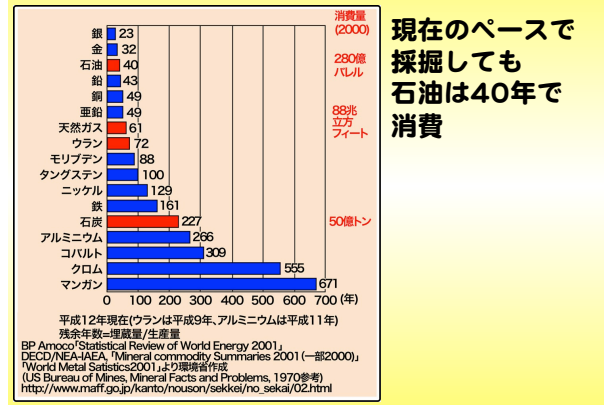


### (6-4b)国別エネルギー事情と中国

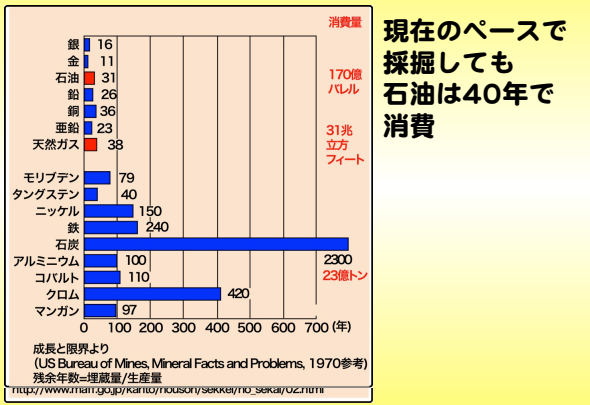
#### 中国の台頭とエネルギー不足



### (4) エネルギー、鉱産資源の残余年数

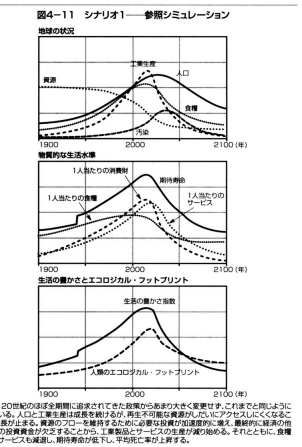


### (4) エネルギー、鉱産資源の残余年数

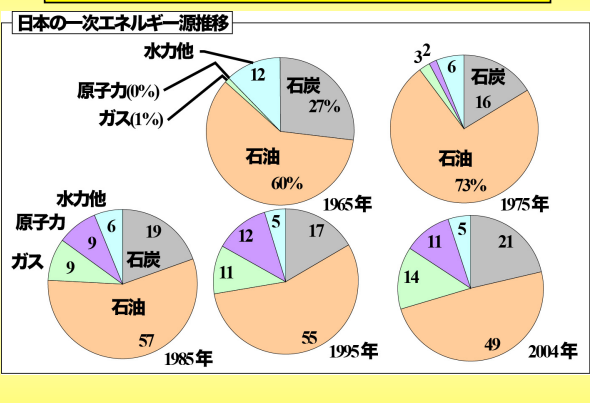


### (6-2)人間圏の拡大と地球の許容量

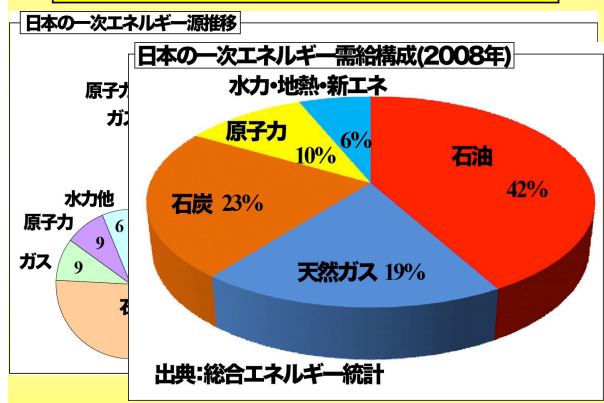
(6-2)実際? 資源が減少するため、採掘にかかるコスト増 工業生産もコスト増 農業生産も、良好な土地と水が不足するのでコスト増  
↓  
2030年くらいに破綻



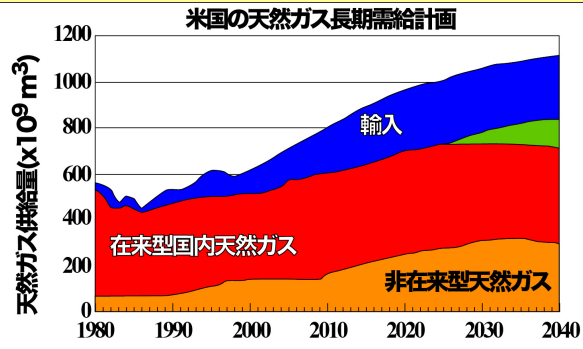
### 日本の一次エネルギー構成



### 日本の一次エネルギー構成



(米国の)天然ガス長期需給計画



(米国の)天然ガス長期需給計画

米国の天然ガス長期需給計画

9 m<sup>3</sup>

1200  
1000

非在来型天然ガス

	原始資源量 (Ronger.H,1996)	貯留層特性	生産量他 (寺崎,2006)
コールベッドメタン (Coalbed methane, 石炭層中のメタン)	258 x10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup>	炭層に吸着 数10m <sup>3</sup> /ton	450億m <sup>3</sup> (米国,2003)
タイトサンドガス (浸透率が低い砂岩に 含まれる天然ガス)	210 x10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup>	k: 0.1-0.5md φ: 5-15%	1300億m <sup>3</sup> (米国,2003)
シェールガス (頁岩に含まれる天然ガス)	456 x10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup>	k: 0.001-2md φ: 4%以下	170億m <sup>3</sup> (米国,2003)
メタンハイドレート	数100 x10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup>		

メタンハイドレート

メタンハイドレート (Type-I)

水分子とメタンガス分子とからなる氷状固体結晶。

水分子は内部に5-6Åの空隙を持った立体網状構造(クラスレート)を作りその空隙にメタンガスが入り込む。

メタンハイドレートの酸素同位体値は周囲より高くなる。

メタンハイドレートには塩素などは含まれない

空隙径 3.6Åの五角14面体

水(46);メタン(8)  
=5.75:1  
=1kg(1L):9.66mol  
=1L:216L  
(c.f.メタンの溶解量は水の体積の2-5倍)

等軸晶系  
水(46);メタン(8)  
=5.75:1  
=1kg(1L):9.66mol  
=1L:216L  
(c.f.メタンの溶解量は水の体積の2-5倍)

空隙径 7.85Åの五角12面体

メタンハイドレート 1m<sup>3</sup> = 約160-170m<sup>3</sup> メタンガス + 約0.8m<sup>3</sup> 水

メタンハイドレート

メタンハイドレート (Type-I)

水分子とメタンガス分子とからなる氷状固体結晶。

水分子は内部に5-6Åの空隙を持った立体網状構造(クラスレート)を作りその空隙にメタンガスが入り込む。

メタンハイドレートの酸素同位体値は周囲より高くなる。

メタンハイドレートには塩素などは含まれない

空隙径 3.6Åの五角14面体

水(46);メタン(8)  
=5.75:1  
=1kg(1L):9.66mol  
=1L:216L  
(c.f.メタンの溶解量は水の体積の2-5倍)

等軸晶系  
水(46);メタン(8)  
=5.75:1  
=1kg(1L):9.66mol  
=1L:216L  
(c.f.メタンの溶解量は水の体積の2-5倍)

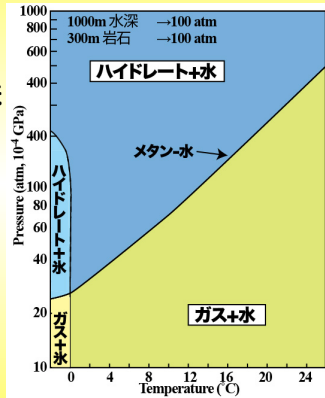
空隙径 7.85Åの五角12面体

メタンハイドレート 1m<sup>3</sup> = 約160-170m<sup>3</sup> メタンガス + 約0.8m<sup>3</sup> 水

メタンハイドレートの安定領域

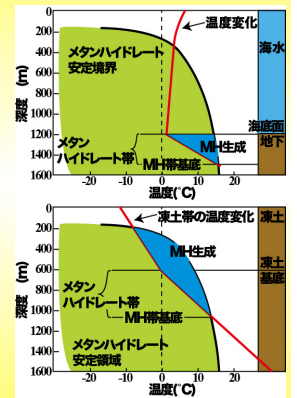
(1)メタンハイドレートの相図:

- ⇒ハイドレートは高压低温で安定。
- ⇒深海4°Cなら→水深400m以深。



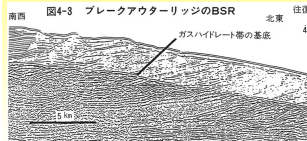
メタンハイドレートの安定領域

- (1)海底の場合
- ⇒400m以深の海底下で安定
  - ⇒右図の場合→1200~1500mで安定。
- (2)永久凍土地帯
- ⇒右図: 表面温度-12°Cの時
  - ⇒200~1000mで安定。



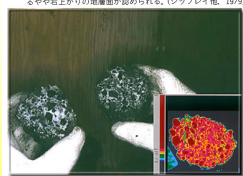
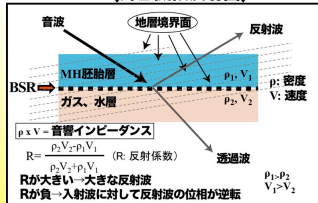
メタンハイドレートの探索とBSR

(1)BSR: 海底擬似反射(Bottom Simulating Reflector)



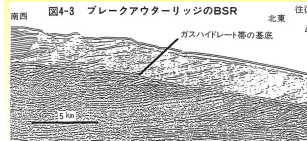
- ①地層の境界面とは斜交し、海底面に平行に強い反射面が存在する
- ②メタンハイドレート層の基底

BSR(海底擬似反射面)



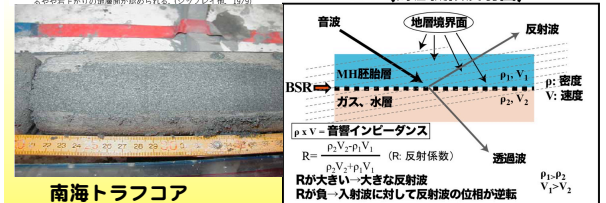
メタンハイドレートの探索とBSR

(1)BSR: 海底擬似反射(Bottom Simulating Reflector)



- ①地層の境界面とは斜交し、海底面に平行に強い反射面が存在する
- ②メタンハイドレート層の基底

BSR(海底擬似反射面)

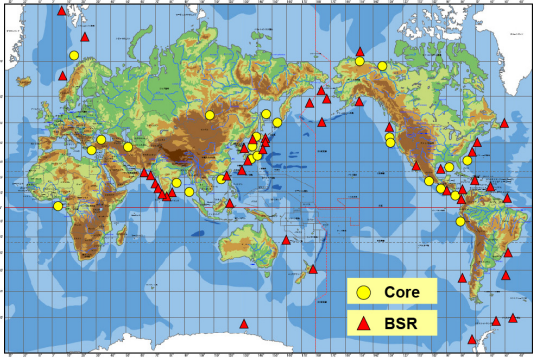


南海トラフコア



### メタンハイドレートの分布

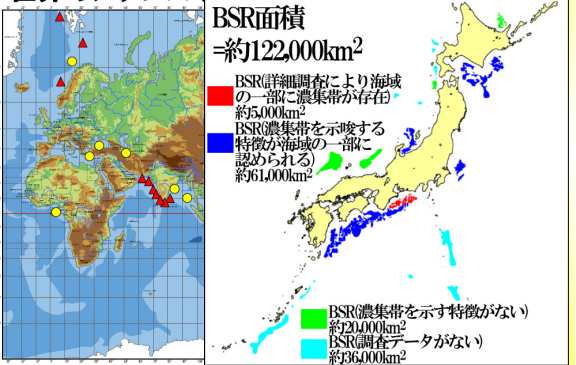
#### 世界のメタンハイドレート分布域



### メタンハイドレートの分布

#### 世界のメタンハ

#### 日本周辺のメタンハイドレート分布



### 石油とは

**石油**：炭化水素類を主成分とし、非炭化水素化合物であるN, S, Oの化合物、微量の金属を副成分とした混合物である。温度圧力条件などにより、気体、液体、固体として産する。

**オイル**：常温・常圧で液体の石油。

**ガス**：常温・常圧で気体の低分子量炭化水素(C<6)を主成分とする石油成分。

**貯留型石油**：鉱床を形成する石油

**非貯留型石油**：分散し堆積岩中に存在しているピチュメン。微量に堆積物、天水や生物中に含まれる炭化水素を分散型炭化水素。

### 石油の分布、年代

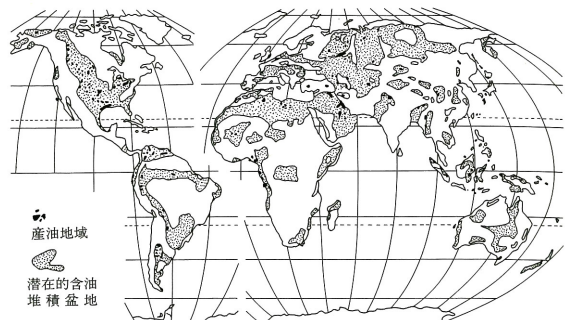


図11 世界の堆積盆地と主な油田の分布 (Fernow, 1970 による)

### 石油の分布、年代

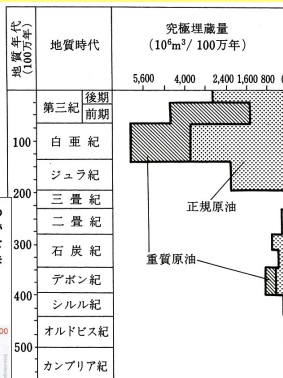
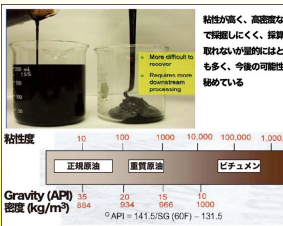


図18 地質時代別みた巨大油田の埋蔵量 (Tissot & Welte, 1984 による)

### 石油の地層

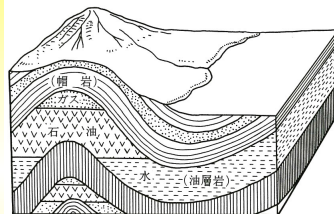


図12 地層の背斜構造での石油のたまり方

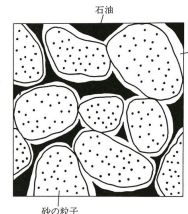
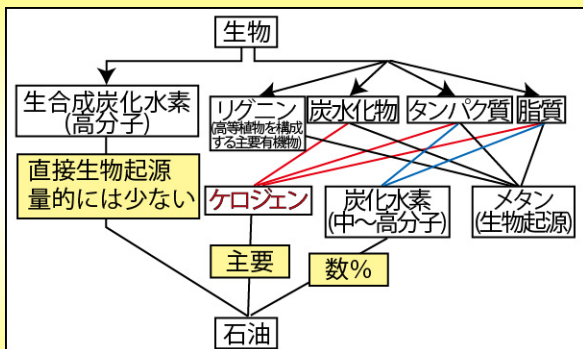


図13 貯留岩中に石油が含まれている状態

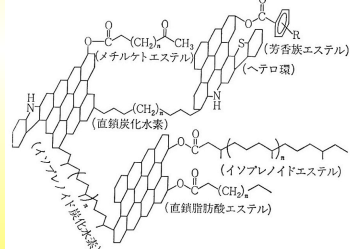
貯留岩中の構成粒子は表面張力の大きな水で覆われ、石油は水の間に存在。水は通常塩水(油田鹹水)で、海水起源とされているが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やアルカリ土類に枯渇、ただし、若い時代の油田鹹水は特に海水に似る

### 炭化水素の起源

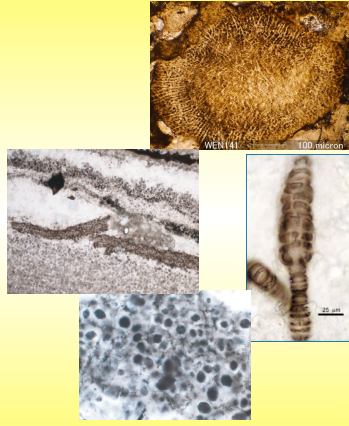


### ケロジェンとは

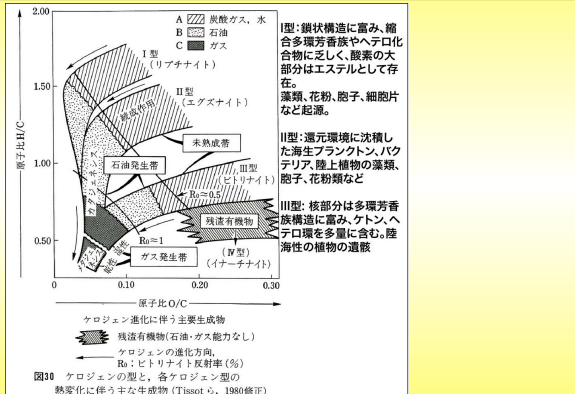
- ①堆積物中に存在する有機溶媒やアルカリ水溶液に不溶性有機物
- ②C,H,Oを主成分とし、少量のN,Sを含んだ複雑な非晶質高分子有機物で、一定の化合物ではない。
- ③核の部分は芳香族構造からなり、アルキル鎖によって、網状構造。
- ④加水分解や酸化を受け易い種々の側鎖を持つ。→熟成によりなくなる



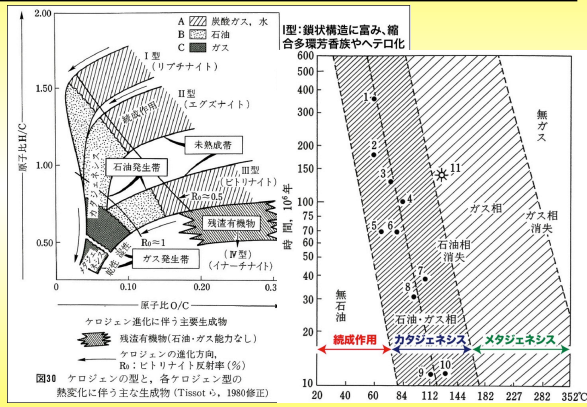
## ケロジェンとは



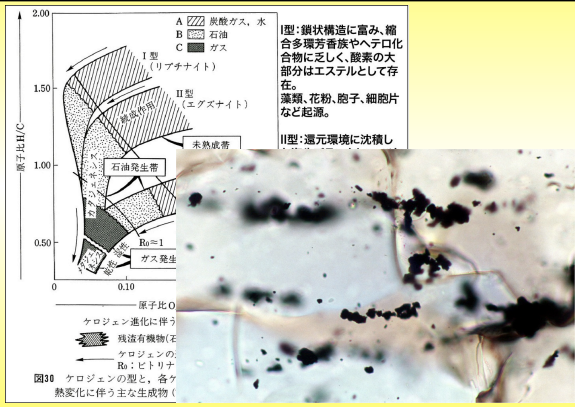
## ケロジェンを4グループに分類と石油生成との関係



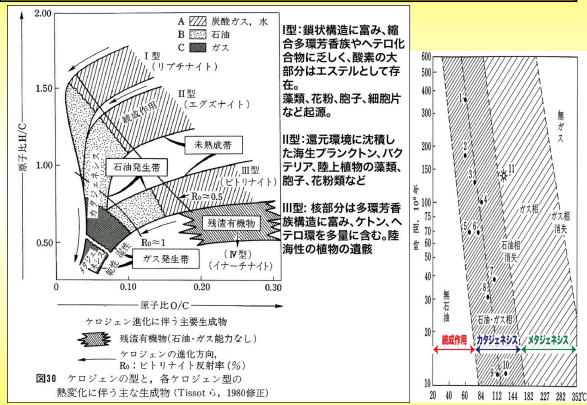
## ケロジェンを4グループに分類と石油生成との関係



## ケロジェンを4グループに分類と石油生成との関係

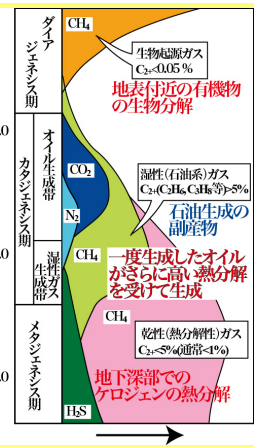


## ケロジェンを4グループに分類と石油生成との関係



## 天然ガス

- (1) 不燃性天然ガス~CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>など
- (2) 可燃性天然ガス~炭化水素, C<sub>1</sub>~C<sub>4</sub>脂肪族炭化水素
- ① 生物起源ガスと熱分解性ガス
- ② 貯留岩ガス: 貯留岩に濃集した有用ガス

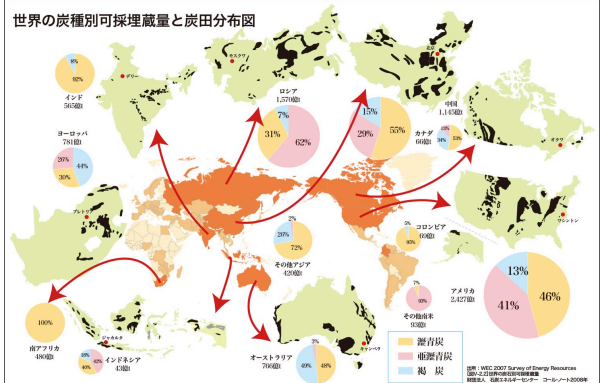


## 石炭の分布、年代

- (1) 年代はデボン紀以降。陸上植物はオルドビス紀(450Ma~)、シルル紀に多様化、デボン紀後期には巨大な森林を形成
- (2) 主要鉱床の時代:
  - ① 石炭紀~二畳紀前半: 管束隠花植物陸上植物
  - ② ジュラ紀~白亜紀前半: 裸子植物やシダ植物
  - ③ 白亜紀後半~古第三紀: 被子植物



## 石炭の分布、年代

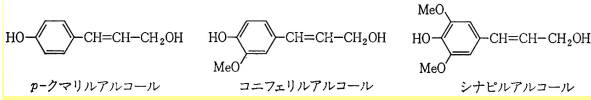
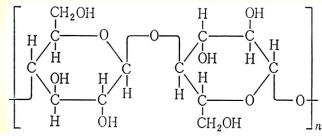




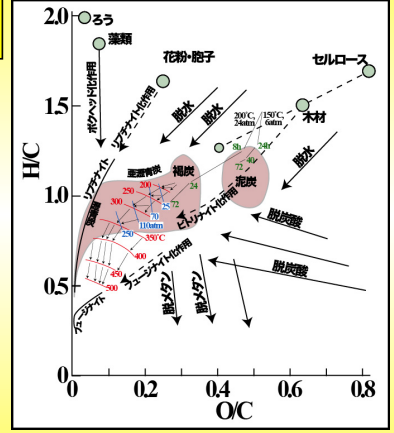
### 石炭の起源物質

#### (3) 石炭の起源物質:

①陸上植物のセルロース(陸上植物, >50%)vsリグニン(ca.30%)  
 セルロース:細胞膜の主要成分  
 リグニン:セルロースで構成された植物組織の結合



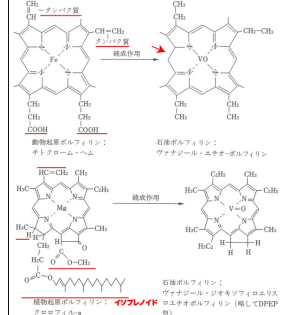
### 石炭の形成プロセス



### 炭化水素

炭素と水素が結合してできた化合物。

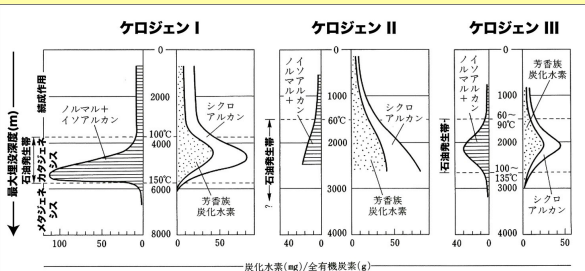
動物性ポリフィリンと石油ポリフィリン(N,O,金属元素)



炭(素)ならびに一般式	例	構造式
アルカン C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub> (鎖状構造)	メタン エタン (ノルマル) n-アルカン イソブタン	CH <sub>4</sub> CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> -CH-CH <sub>3</sub>
シクロアルカン C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> (環状構造)	シクロプロパン シクロヘキサン	CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub>
アルケン C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> (鎖状、二重結合あり)	エチレン プロピレン イソブチレン	CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> =C-CH <sub>3</sub>
シクロアルケン C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub> (環状、二重結合あり)	1,3-シメチルシクロヘキセン	CH <sub>2</sub> =CH-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub>
アルキン C <sub>n</sub> H <sub>2n-2</sub> (鎖状、三重結合あり)	アセチレン	H-C≡C-H
ベンゼン系 C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (環状、芳香族)	ベンゼン トルエン ナフタレン アントラセン	<chem>c1ccccc1</chem> <chem>c1ccc(cc1)C</chem> <chem>c1ccc2ccccc2c1</chem> <chem>c1ccc2c(c1)ccc3ccccc32</chem>

図1 主な炭化水素の分類 四面体命名法、( )内は慣用名

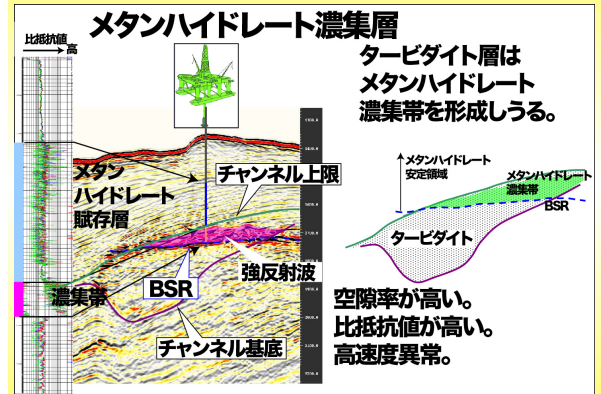
### カタジェネシス期と炭化水素形成(石油生成)



①ケロジェンタイプにより石油(炭化水素)が生じる温度は異なり、かつ生じる炭化水素の種類も異なる。  
 ②カタジェネシス期(石油生成期)で生じ、メタジェネシス期では石油生成は終了。

①特に、I型は安定なC-C結合が主な化学結合のため、オイル生成は比較的高温で始まり、狭い温度範囲で起る。

### メタンハイドレートの濃集帯

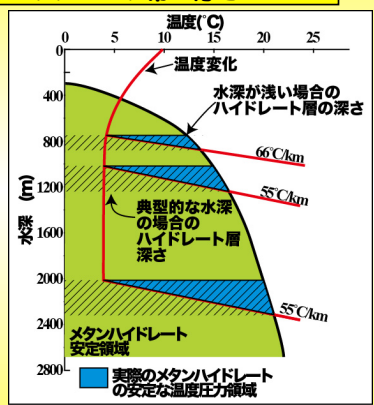


タービダイト層はメタンハイドレート濃集帯を形成しうる。

空隙率が高い。比抵抗値が高い。高速度異常。

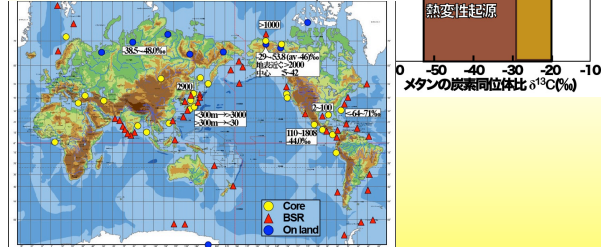
### メタンハイドレート帯の厚さ

一般に水深が深い方が、より厚いメタンハイドレート層を形成しやすい

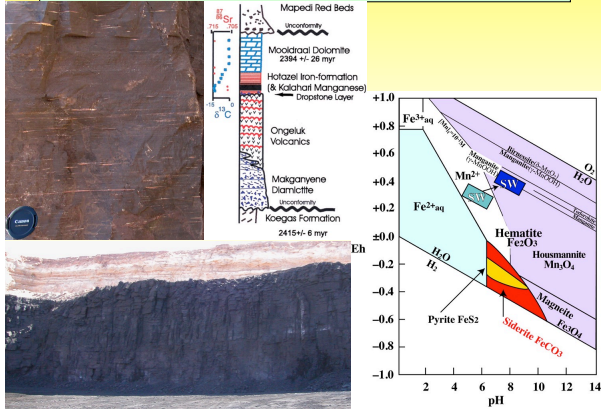


### メタンの起源

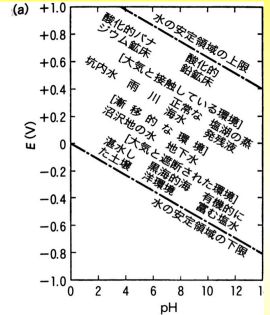
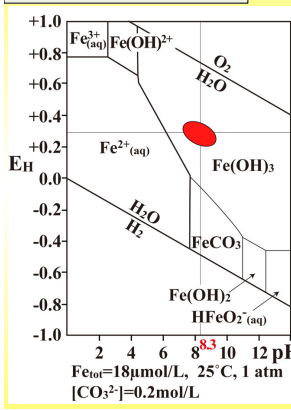
- 生物発酵起源のガス(メタン生成)
- 有機物の熱分解起源のガス
- 火山性ガス



### 縞状マンガン層の形成と酸素濃度

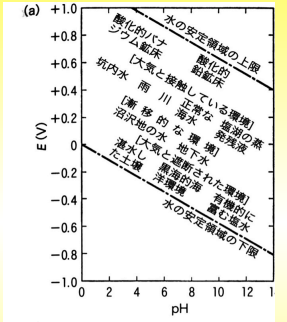
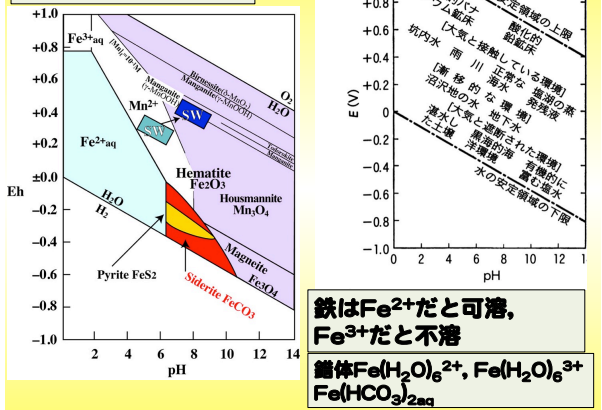


### Feについて



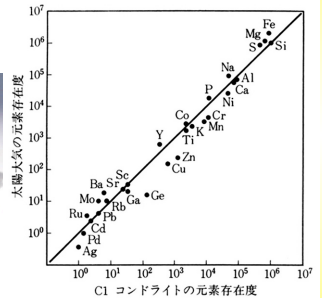
鉄はFe<sup>2+</sup>だと可溶,  
Fe<sup>3+</sup>だと不溶  
錯体Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>2+</sup>, Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>3+</sup>  
Fe(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub>

### Mnについて



鉄はFe<sup>2+</sup>だと可溶,  
Fe<sup>3+</sup>だと不溶  
錯体Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>2+</sup>, Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>3+</sup>  
Fe(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub>

### 太陽系の組成(宇宙存在度)と炭素質コンドライトの組成



ガス成分以外はよく一致