

エネルギーの安定供給への挑戦 ～石油・天然ガスの上流開発を知る～

2023年12月2日

公益社団法人石油学会

教育委員会移動大学講師

阿久津 亨

本資料には、受講者の皆様の理解を深めるため、一般に公開していない図表等を使っている場合があります。本講義の目的（予習や復習等）以外での資料の複製、転載、公表を禁止いたします。

講師紹介

- ・ 北海道旭川市生まれ
- ・ 北海道札幌南高等学校卒業後、東京大学理学部地学科（地質学）卒業
- ・ 家族：妻、息子2、娘1、孫2

<職歴>

- ・ **旧石油公団（JNOC）：1984年～2003年**

石油・天然ガスの探鉱・開発に従事。この間、英国（スコットランドAberdeen市）に2年、米国（テキサス州Houston市）に4年半赴任、南極に2ヶ月、中国（新疆ウイグル自治区）に半年、調査で滞在

- ・ **国際石油開発帝石(株)（INPEXに社名変更）：2004年～2018年**

石油・天然ガスの探鉱・開発に従事。この間、インドネシア（Jakarta市）に3年半、新潟市に4年赴任、島根県浜田市には出張ベースで約半年滞在

- ・ **(株)INPEXソリューションズ：2019年～**

気候変動のメカニズム、エネルギー全般の調査業務に従事

- ・ **(公社)石油学会の教育委員会移動大学講師（資源担当）：2021年～**

講義内容

1. 石油・天然ガスとは

- (1) 一次エネルギーの分類、(2)石油の成分と分類
- (3) 石油・天然ガス産業の流れ(上流と下流)と歴史
- (4) 石油・天然ガスの利点と欠点

2. 石油・天然ガス鉱床

- (1) 鉱床を生みだす堆積盆地、(2) 鉱床成立の5要件、(3) 埋蔵量(資源量)評価

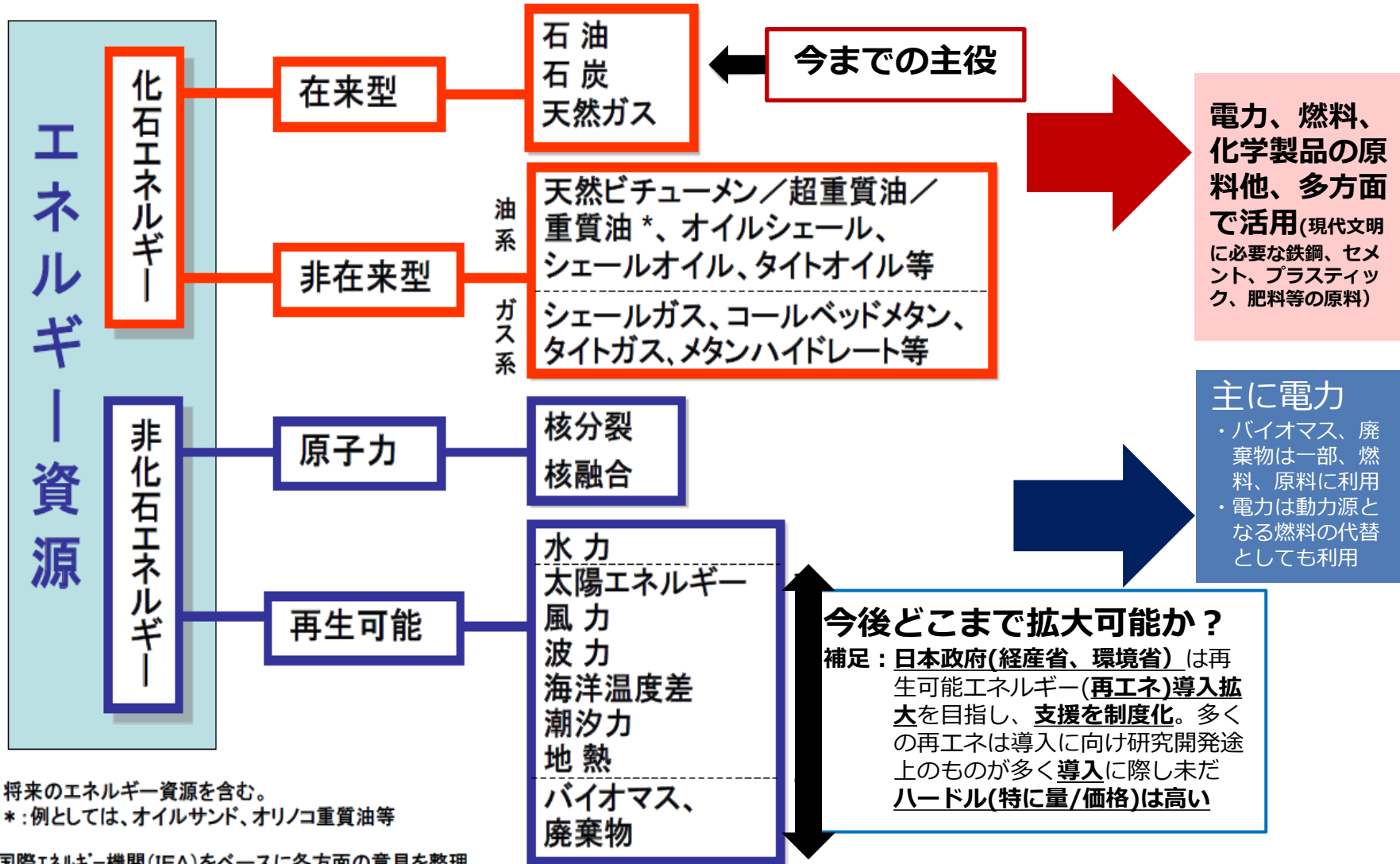
3. 上流開発の事業内容

- (1) 探鉱・開発・生産作業の流れ、(2) 事前調査・鉱区取得、(3)物理探鉱
- (4) 坑井の掘削、(5) 開発作業、(6) 原油の二次回収と三次回収
- (7) CCS/CCUS導入の背景

4. 非在来型石油・天然ガス資源の開発

5. まとめ

一次エネルギーの分類の例



1.石油・天然ガスとは



石油技術協会誌表紙

原油とは？



<さまざまな原油/コンデンセート>
原油には高粘性のものから低粘性のものまで**性状は多様**。重質油から軽質油やコンデンセートになるに従い黒色から黄色/無色透明化、硫黄含有量も低下

(株)INPEX技術研究所 (@世田谷区烏山) に保管

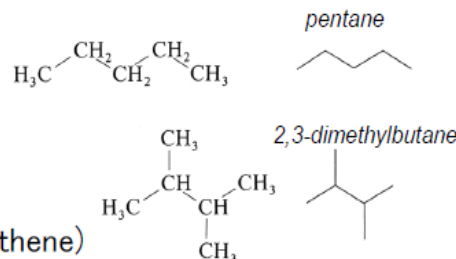
石油・天然ガスの化学組成

炭化水素・非炭化水素 —”SARA”

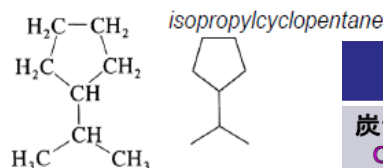
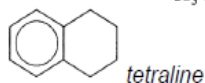
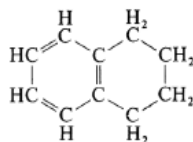
・飽和脂肪族 (Saturated hydrocarbons, saturates)

鎖式炭化水素 (alkane, paraffin)

環式炭化水素 (cycloalkane, cycloparaffin, naphthene)



・芳香族 (Aromatic hydrocarbons, aromatics)



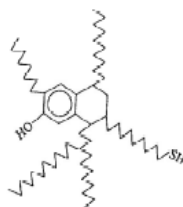
・NSO化合物 (窒素、イオウ、酸素化合物)

レジン (Resin)

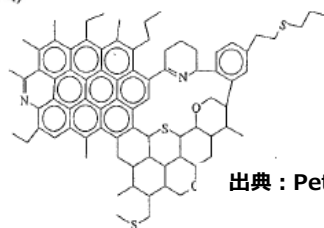
アスファルテン (Asphaltene)

・その他の混合物

CO_2 、 H_2O 、Ni、V、Hg



イオウを水素化
精製により製油
所で取り除く脱
硫装置は高価



出典：Petroleum Geochemistry and Geology, 2nd ed., Hunt, 1995

	石油	天然ガス
炭素 C	84–87%	65–80%
水素 H	11–14%	1–25%
硫黄 S	0.06–2%	0–0.2%
窒素 N	0.1–2%	1–15%
酸素 O	0.1–2%	0%

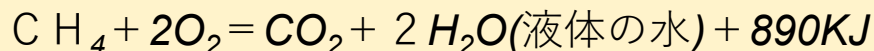
出典：Non-Technical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Production, Hyne, 2001

・石油・天然ガスの主体は炭化水素

・化学組成によって炭化水素の起源(堆積環境)も解明(参考資料(1)参照)

・炭素、水素が酸素と結びつく反応(燃焼)は発熱反応⇒高密度なエネルギーの源泉!

<メタンの例>



比重による原油の分類

比重(Specific Gravity)・API度(API Gravity)

油の比重とAPI度

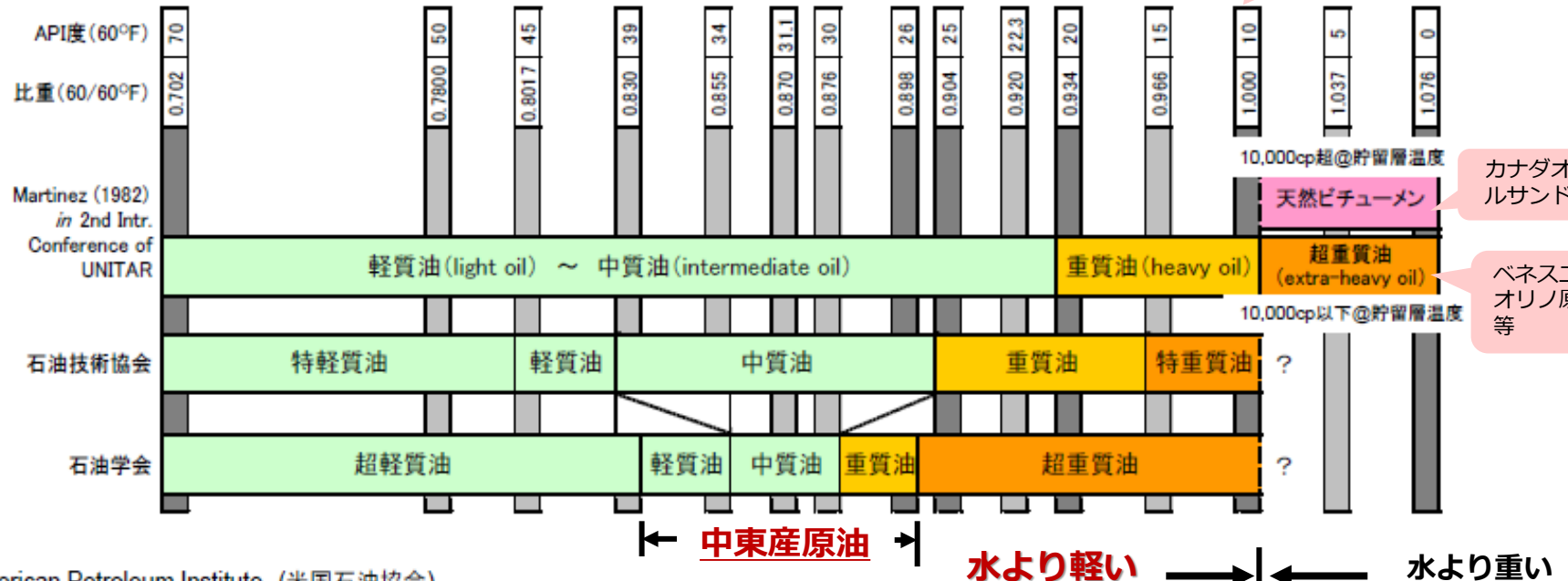
- 比重 (SG):ある体積の油の重量と、同体積の水の重量の比
- API度: $^{\circ}\text{API} = 141.5/\text{SG} - 131.5$ (SG:60°F/60°F)

比重は油・ガスの組成に依存する

ガスの比重

- 基準状態における、ある体積のガスの重量と、同体積の空気の重量の比
- 100%メタンガスで0.55、一般的な天然ガスは0.6~0.8程度

比重1=API 10度



API: American Petroleum Institute (米国石油協会)

UNITAR: United Nations Institute for Training and Research (国際連合訓練調査研究所) を基に報告者加筆

- ・原油はカナダオイルサンド(天然ビチューメン)、オリノコ超重質油等を除き水より軽い
- ・日本の製油所は一般的に中東原油対応(25°API(比重0.90)~40°API(比重0.83)、硫黄分 1.5~2%)
- ・メキシコ産マヤ原油(硫黄分3.5-4%)、ベネズエラ原油(*)等は中東産原油より比重が重い
- 補足(*): 米国メキシコ湾沿いの製油所ではこれら重質油の精製が可能
- ・一般的に東南アジア産、中国産原油は中東産より比重が軽く硫黄分が殆ど含まれていない

バレル（単位）の由来

Edwin Drake 氏による
世界初の機械掘り石油井

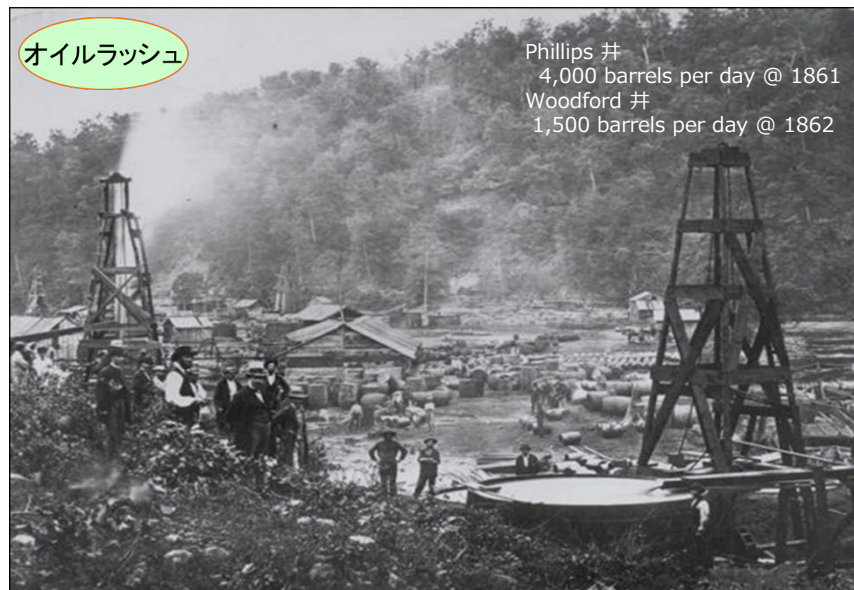


出典 : alamy.com

アメリカ合衆国ペンシルバニア州タイタスビル
1859年8月27日：近代石油産業のスタート日と
言われる。

深さ : 69.5 ft (21.2m)
生産量 : 日産30バレル

1862年のOil Creek Valley,
Pennsylvania



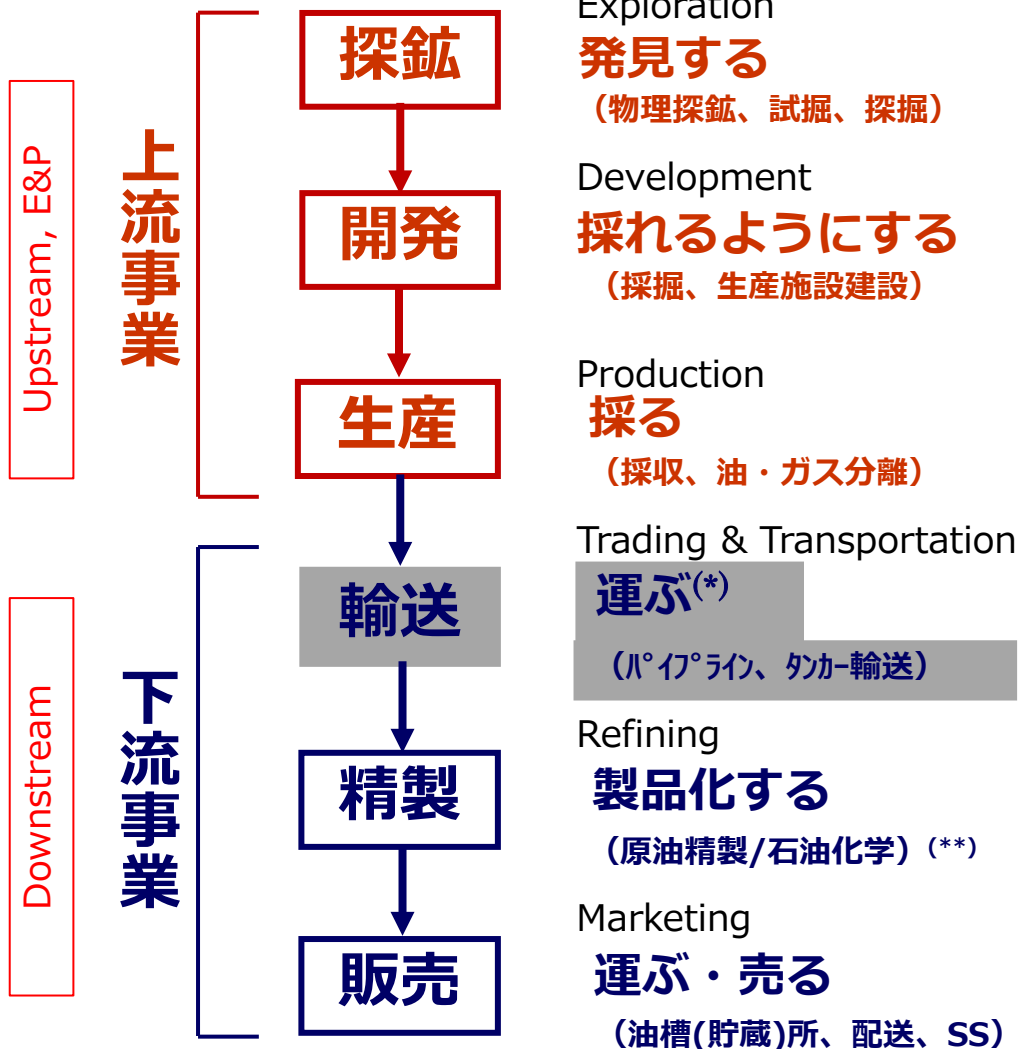
出典 : Earlyoilfield.jpg

Barrel (bbl) 単位の由来 :

米国産原油を欧州に輸出する際に、英国から輸入したシェリー酒の空き樽に入れたのが始まり、と言われている。

barrel : 樽, $1 \text{ barrel (bbl)} = \text{約}159 \text{ liters (L)}$
 $1 \text{ m}^3 = \text{約}6.29 \text{ barrel (bbl)}$

石油・天然ガス産業の流れ



出典：PGSホームページ



出典：INPEXホームページ



出典：INPEXホームページ



出典：川崎重工ホームページ



出典：JFEエンジニアリングホームページ



出典：INPEXホームページ



出典：石油化学工業協会



出典：INPEXホームページ

なお、「上流事業」は一般的に「上流開発」、「探鉱と開発」ともよばれている

補足 (*): 輸送部門は中流ともいう

(**): 下流事業の石油精製・石油化学の流れについては[参考資料\(2\)](#)を参照

石油産業の歴史と今日の主要石油会社

世界の石油産業の大きな流れ

・ **石油時代の到来**
1886年:ガソリンエンジン発明
1892年:ディーゼルエンジン発明

・ **セブンシスターズの寡占時代**
テキサコ, ガルフ, ロイヤルダッチ・
シェル, BP, スタンダード石油解体
後のエクソン, モービル, シェブロン

・ **オイルショック**
1973年:第四次中東戦争
補足:1974年IEA(国際エ
ネルギー機関)設立
1979年:イラン革命

メジャー石油支配から
の産油国の目覚め

・ **産油国国営石油
会社の海外進出**
・ **1990年代(低
油価時)のM&A、
メジャーの再編**

日本の石油産業(上流)の歴史

1888年:日本石油設立

1941年:帝国石油設立
・ 戦時下上流事業の一元化
・ 南方石油開発要員約1600名犠牲

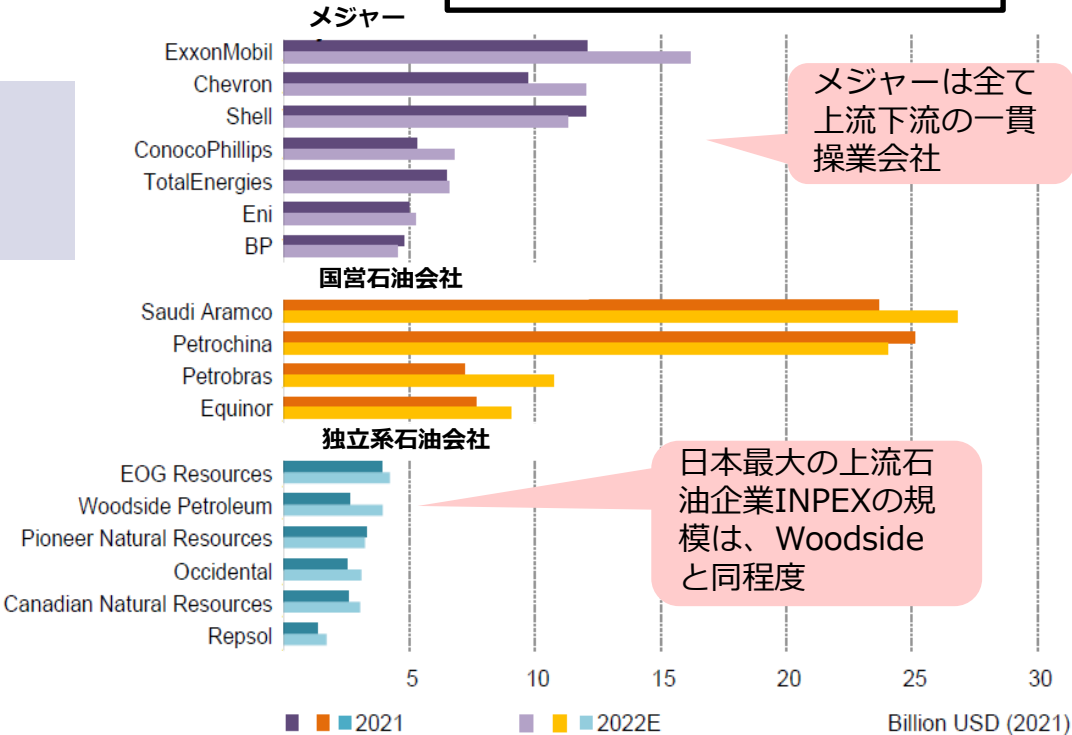
1945年:敗戦
・ 1949年: **占領軍が石油精製業再開を許可**
・ 日本の戦後復興は中東産原油購入から!
・ 上流部門の海外進出の遅れ!

**業界再編を経てINPEX、JAPEX、JX等
が活動**
・ 石油開発公団(1967年設立、78年石油公団
に改称、現JOGMEC)を通して政府の上流事
業への民間支援
・ 背景: エネルギーの原油依存度
原油の中東依存度の高さ
・ 目標: 中東依存度の低減(*)
自主開発原油の推進他

補足(*): **日本の製油所は中東原油対応**(硫黄分1.5-2%、
API 25-40度)のため、当初の「**中東以外からの日
本への原油持ち込み**」支援の考えから「**権益確保**
(原油の処分権/販売権)」支援へ移行

今年(2022)はオイルショック
(石油危機)から50年!

主要石油会社の**上流事業**へ の直近の年間投資額



石油・天然ガスの利点と欠点

利点

- ①加工しやすく利用しやすい
- ②エネルギー密度が高い
- ③貯蔵・運搬がしやすい

これら利点により
石油・天然ガス上流事業は利益率の高い事業として発展

欠点

- ①偏在している

参考:再生可能エネルギー(再エネ)を電力に変換する際には、化石エネルギーを電力に変換する際より、大量の鉱物資源が使われる(参考資料(2)参照)。しかもこれら鉱物資源は化石エネルギーより偏在し、その精錬については中国の寡占度が高い(参考資料(3)参照)

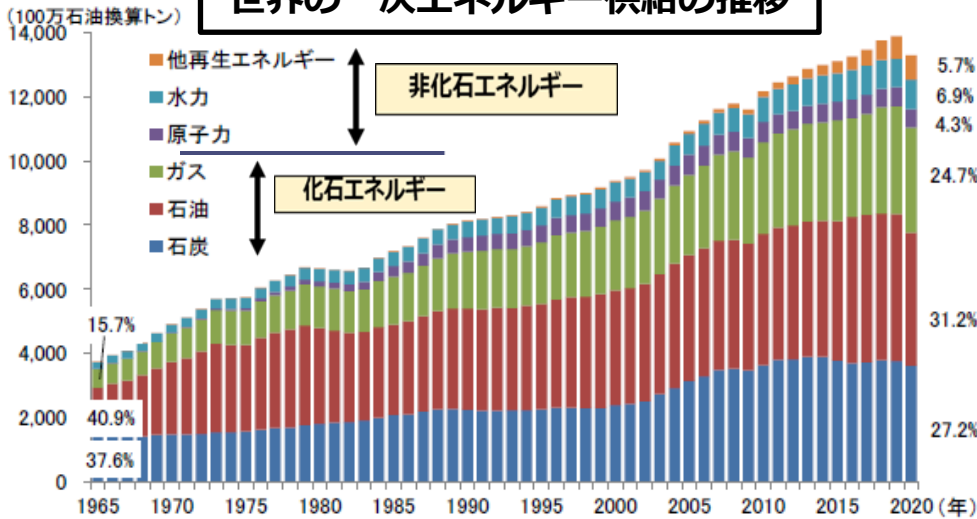
- ②燃焼する際に温室効果ガス(特にCO₂)を発生

参考:CO₂排出係数(tC/toe:炭素換算トン/石油換算ト):石炭1.12>石油 0.84>天然ガス 0.64
CO₂の他に公害の原因となった窒素酸化物/硫黄酸化物も燃焼の際に排出(現在は排出規制が強化)。なお再エネも設備建設に伴いある程度のCO₂を排出

1.石油・天然ガスとは

世界の一次エネルギー供給と最終エネルギー消費の推移と主な流れ～加工・利用のしやすさ～

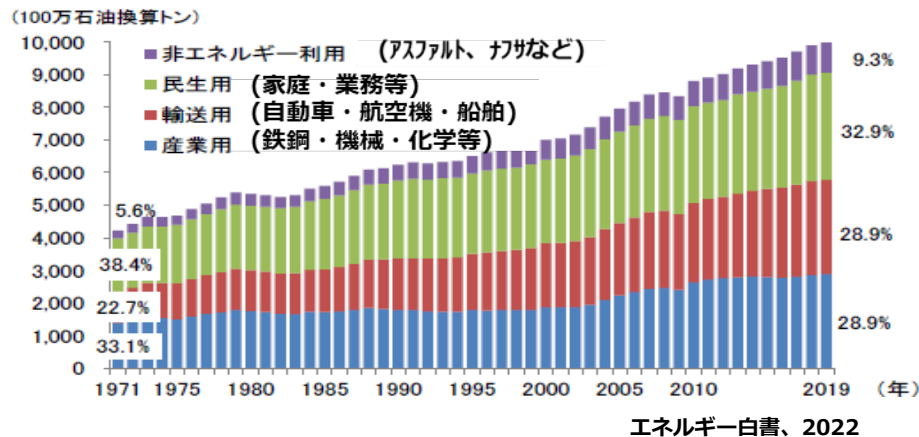
世界の一次エネルギー供給の推移



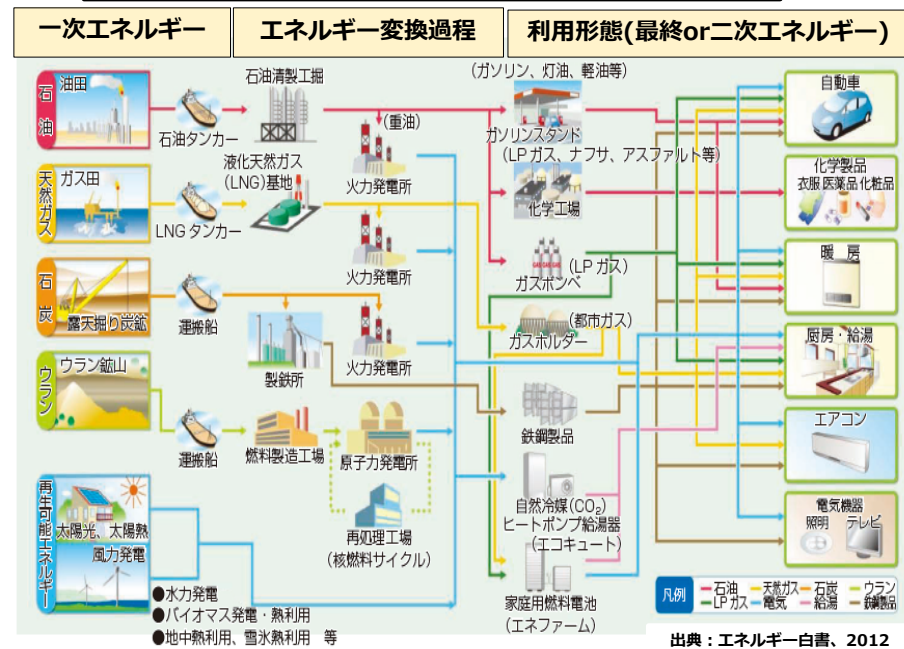
両図の縦横軸は同スケール

エネルギーロス発生

世界の部門別最終エネルギー消費の推移



一次エネルギーから最終エネルギーへの変換



<石油の加工>

- 石油は発電用に一部使われるが、主に**石油精製**にてガソリン、灯油、軽油、重油等の**燃料**となる**石油製品の原料**
- 石油化学**(製品は日常生活で活用)の**原料**は主に石油精製で作られる石油製品の**一つであるナフサ**
→**石油は加工しやすく、利用しやすい!**

<エネルギーロス>

- 一次エネルギーと最終エネルギーとの差を**エネルギーロス**
- エネルギーロスの要因: 発電/石油精製/石油化学等のエネルギー変換部門、送電、輸送中、未活用再エネ等でのロス
- 主要なエネルギーロス: 化石エネルギー**(石炭/石油/天然ガス)を**電力**に変える**変換ロス**(**熱エネルギーとして損失**)

日、英、独、仏の可住地面積

火力発電所
の面積も
ほぼ同規模

国名	国土面積 (万km ²)	可住地面積 (万km ²)	国土面積に 占める可住 地割合(%)
日本	37.86	10.35	27.3
イギリス	24.38	20.63	84.6
フランス	54.79	39.72	72.5
ドイツ	35.67	23.79	66.7

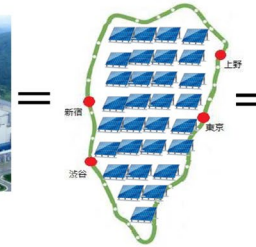
出典：国土地理院

原子力、火力発電と同じ発電量を得るために必要な面積

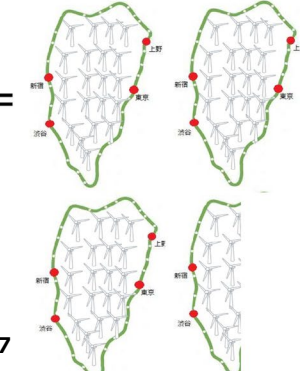
原子力発電所
100万kW級
(約0.6km²)



太陽光発電
山手線一杯の面積
(約58km²)



風力発電
山手線の3.4倍の面積
(約214km²)

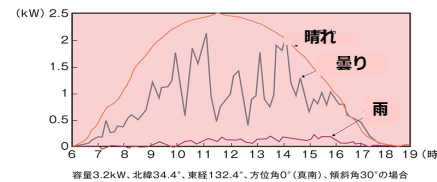


これまでの
陸上風力発
電の場合

出典：原発のコストを考える、エネ庁 2017

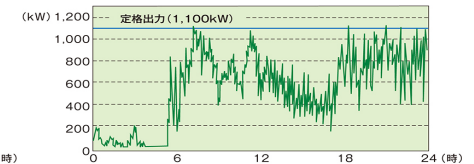
太陽光・風力発電の出力変動

太陽光発電の出力変動(夏季)



太陽光発電は時間と
天気で発電量が変化

風力発電の出力変動(冬季)



出典：電気事業連合会

風力発電は風の強さ
で発電量が変化

・化石エネルギーでの発電は小さな用地で多くの電力量を生み出す(太陽光発電の1/100、陸上風力の1/350の用地面積)

火力発電の高い設備利用率

- ・ **設備利用率** = 経過時間内の総発電量(kWh)/(経過時間 × 設備の出力(kW)) × 100
- ・ 日本では経産省/NEDOが指標を提示(太陽光発電:13%,陸上風力発電:20%,洋上風力発電:30%,地熱発電:70%,火力発電:80%)
- ・ 火力発電で重油 1 m³からの電気エネルギーは、高さ100mのダムを使った水力発電所の約20,000m³の水量に匹敵(掛谷、2020)

・ **火力発電は自然由来の再生可能エネルギー発電(変動電源)の調整電源(*)としても有効**

- ・ 変動電源の大量導入による電力系統の出力不安定化→周波数の乱れ(発電機の回転数変化)による産業用機器障害、生産ライン停止

補足(*)：蓄電技術が発達すれば調整電源は不要。今日の蓄電技術は小容量/短時間は可能だが、大容量/長時間は研究開発中→電気は貯められない！

石油・天然ガスの貯蔵/運搬のしやすさ

石油の備蓄基地（鹿児島県喜入基地）



https://www.eneos.co.jp/company/csr/report/pdf/jx/2014_all.pdf

石油コンビナートの石油タンク



<https://www.paj.gr.jp/about/data/energytt.pdf>

ドラム缶



MTKホームページ

ポリタンク



MismiNovaホームページ

LPガス備蓄



七尾ガスターミナル 国備エリア

<https://www.eneos-globe-gt.co.jp/stockpiling/>

LNGタンク(直江津)



出典：INPEXのホームページ

石油・天然ガスは緊急時(供給途絶時;オイルショック等、災害時;3.11等)に備えた貯蔵/備蓄(*)が可能で、石油は緊急時/インフラ未整備地域での手軽な運搬が可能!

補足(*):1975年備蓄法制定

- ・石油・ガスとも今日の日本の備蓄量は約半年分の使用量
- ・天然ガスを液化貯蔵するタンク備蓄はBOG(BoilOff Gas)問題で(メタンガスは-162℃(cf.水素は-253℃)で気化)長期は困難
- ・日本では地下備蓄が地質学的に困難なため、ガスのタンク備蓄はメタン(天然ガスの主成分)ではなく、貯蔵し易いLPG(プロパン、ブタン等の成分の重い液化し易いガス)が対象

1.石油・天然ガスとは

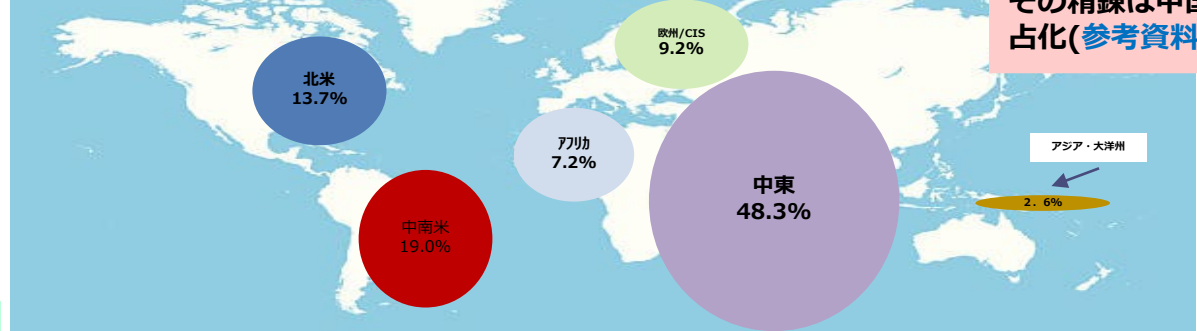
化石エネルギーの確認可採埋蔵量(2020年)

～埋蔵量は偏在～

エネルギートランジションに必要な不可欠な鉱物資源は石油・天然ガスより偏在度が高く(参考資料(3))、その精錬は中国が寡占化(参考資料(4))

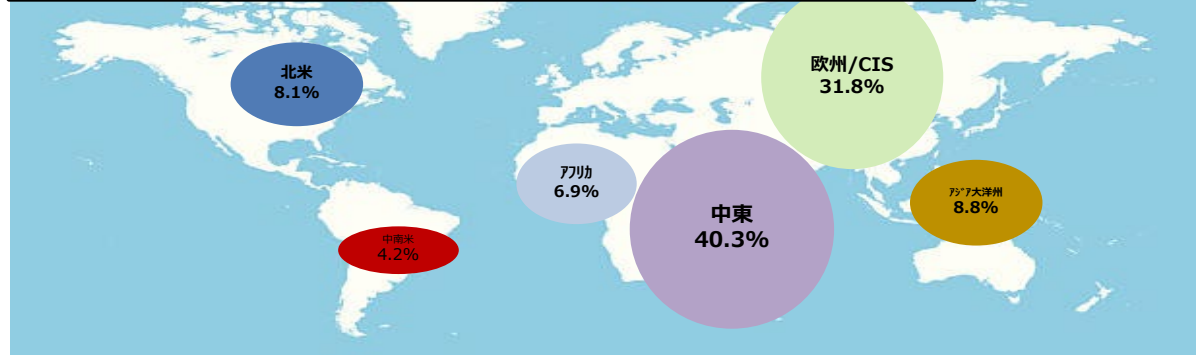
原油

原油の確認可採埋蔵量(2020) : 1兆7324億バレル。可採年数53.5年



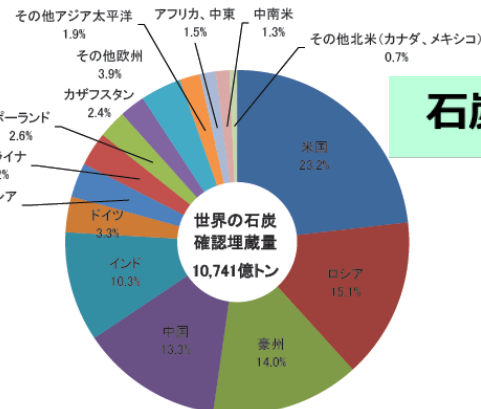
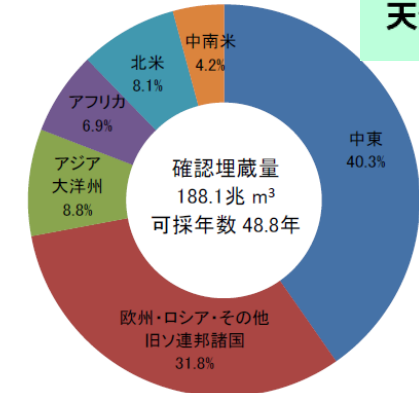
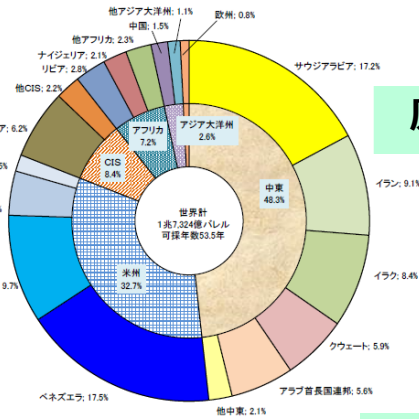
天然ガス

天然ガスの確認可採埋蔵量(2020) : 188.1兆m³。可採年数48.8年



石炭

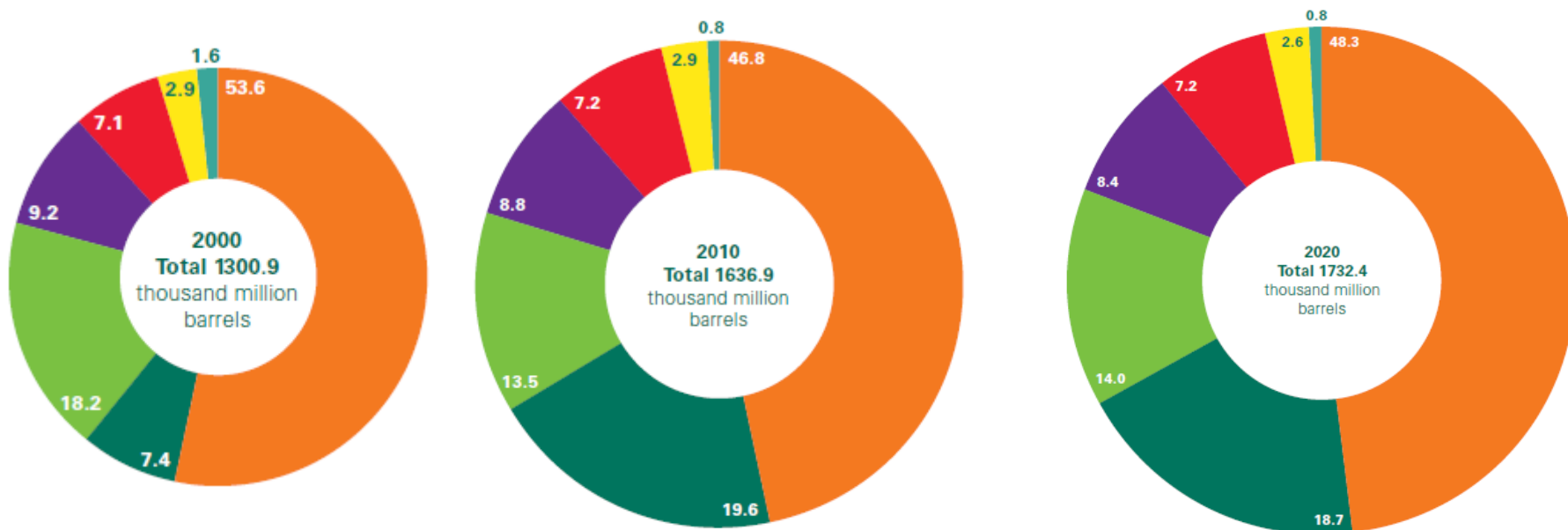
石炭の確認可採埋蔵量(2020) : 1兆741億トン。可採年数142年



出典 : BPのStatistical Review of World Energy 2021を基にエネ庁が作成(エネルギー白書2022)

地図上の図示は左図を基に筆者作成

世界の原油の確認可採埋蔵量推移 ～使っても減らない埋蔵量？～



出典：BP統計2021

- 原油の確認可採埋蔵量
2000年：1兆3,000億バーレル
2010年：1兆6,400億バーレル（2000年比で26%増）
2020年：1兆7,300億バーレル（2010年比で 5%増）
- 年間消費量は約360億バーレル（日量約 1 億バーレル）

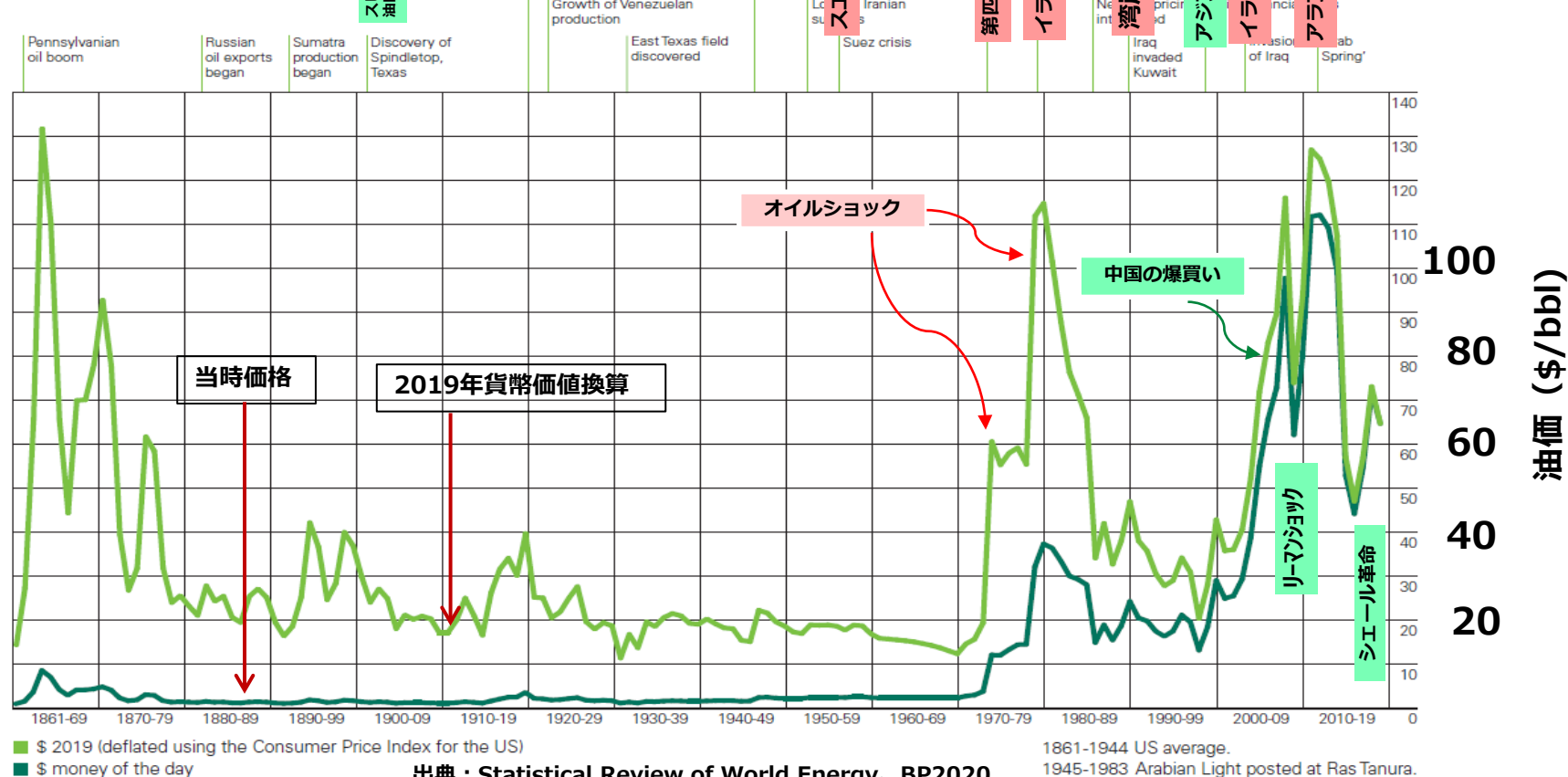
- 1990年代～2000年にかけて石油は30～40年で無くなるといわれたが、**技術の進展**による既存油田での**埋蔵量成長**及び**探鉱による新たな発見**による**埋蔵量増加**→だが使い続けるためには**継続的な投資が必要**！

**上流投資抑制
で埋蔵量伸び
率が急減**

偏在がもたらす原油価格の変動

Crude oil prices 1861-2019

US dollars per barrel
World events



石油産油国の紛争は油価の乱高下の大きな要因！

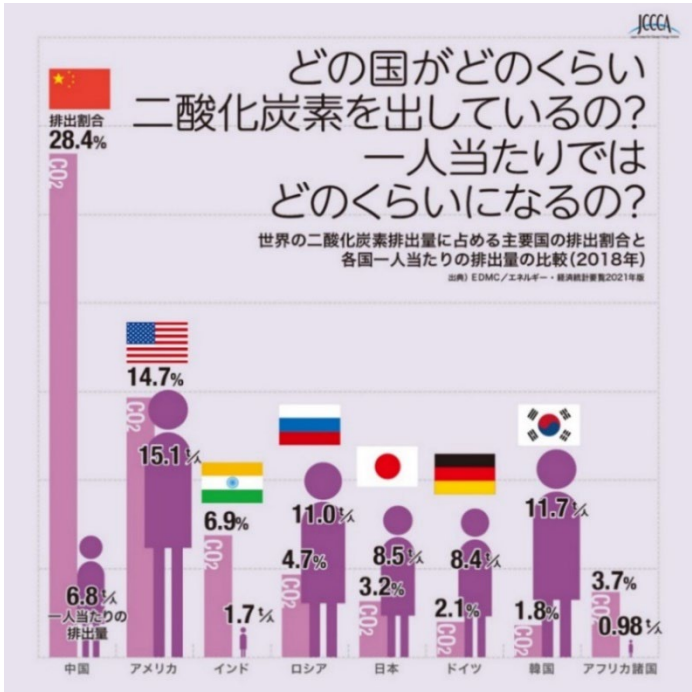
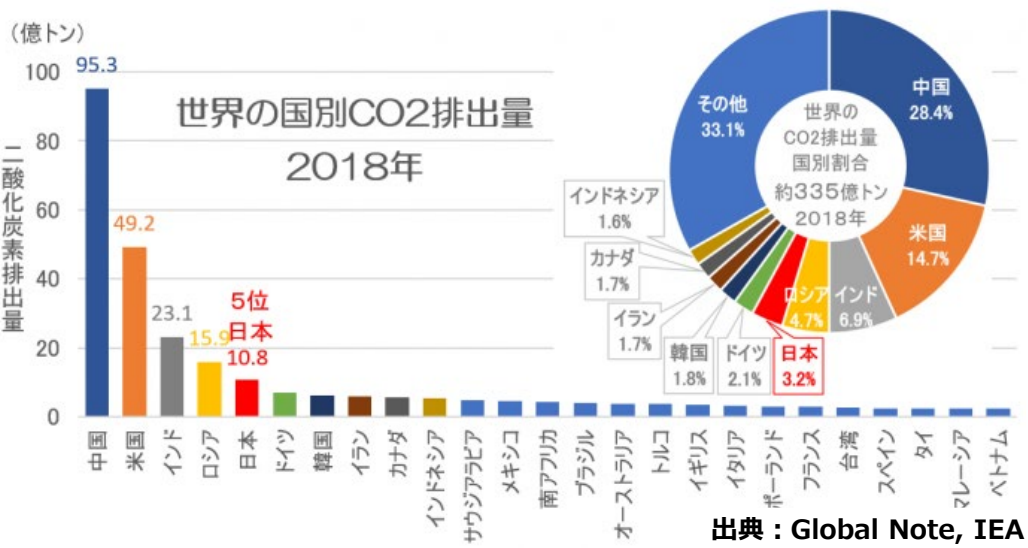
補足：世界の原油取引市場の**3大指標原油**（北米、欧州、アジア）：①**WTI**：米国の原油先物取引市場(NYMEX)等での指標原油、WTIとはWest Texas Intermediate、②**ブレント**(Brent)：ロンドンの原油先物取引市場（ICE）等の指標原油、③**ドバイ**（Dubai）：東京商品取引所（TOCOM）等での指標原油

直近では**コロナ禍での油価の下落、ロシアのウクライナ侵攻での油価(*)の上昇**

補足(*)：**ガス価格も高騰。2021年末より欧州で再エネの風力が弱かったため、発電用のガス需要が高まり価格が高騰。ロシアのウクライナ侵攻はさらに拍車をかける要因となった。**

石油・天然ガスの欠点：**燃焼によりCO₂排出**

国別CO₂排出量(2018年実績)



- ・大気中のCO₂濃度は1750年(**280ppm**, 0.028%)から現在の**410ppm**に上昇。今日ほぼ2ppm/年の割合で増加し、その**主要因は化石エネルギーの燃焼**とされている
- ・**国別CO₂排出量(2018年実績)**では**中国**、**米国**、**インド**で**世界のほぼ50%**を占め、**2050年には中国とインドで50%**を占めると予測
- ・**一人当たりのCO₂排出量**では**先進国が高く**、特に**米国**、**ロシア**、**韓国**が高い。これは各国の事情(安価なエネルギー供給を国是、寒冷地等)を反映したもの。

補足：産業構造によりCO₂排出量費は変化(**製造業はCO₂排出量が多くし**、**情報・サービス業等はCO₂排出量は少ない**)。但し、化石エネルギーにあり着けない国・地域も未だ多い(薪炭等を使用)。

→**良質で安価なエネルギー供給は産業競争力の源泉**ではあるが、**CO₂排出量削減**には**米国**や、今後多くの化石エネルギー消費が予測される**中国/インド**の**協力**が必要であることに加え、途上国の目標となる**先進国のエネルギー効率利用・省エネ(*)**も必要。

補足(*)：エネルギーの効率利用/省エネは日本の得意分野

1. 石油・天然ガスとは

- (1) 一次エネルギーの分類、(2)石油の成分と分類
- (3) 石油・天然ガス産業の流れ(上流と下流)と歴史
- (4) 石油・天然ガスの利点と欠点

2. 石油・天然ガス鉱床

- (1) 鉱床を生みだす堆積盆地、(2) 鉱床成立の5要件、(3) 埋蔵量(資源量)評価

3. 上流開発の事業内容

- (1) 探鉱・開発・生産作業の流れ、(2) 事前調査・鉱区取得、(3)物理探鉱
- (4) 坑井の掘削、(5) 開発作業、(6) 原油の二次回収と三次回収
- (7) CCS/CCUS導入の背景

4. 非在来型石油・天然ガス資源の開発

5. まとめ

化石エネルギーとしての石油・天然ガス鉱床

石油鉱床の成立

⇒ 有機物に富んだ岩石(根源岩)、
孔隙の発達した岩石(貯留岩)の
形成



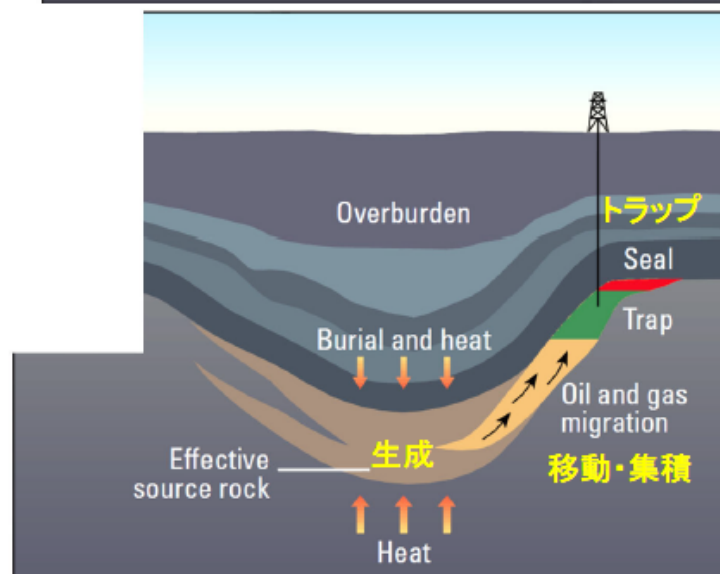
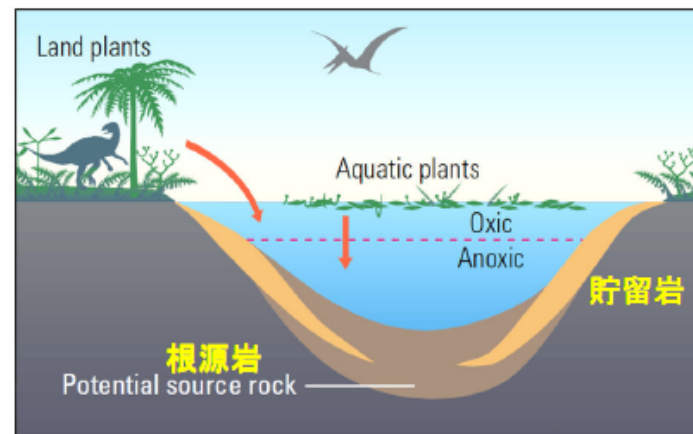
⇒ 石油を 貯める トラップの存在
根源岩での石油生成
生成した石油の移動・集積



⇒ 鉱床の保存

石油鉱床成立に至る地質過程の模式図

出典：Basin and petroleum system modeling, Al-Hajeri et al., 2009



- ・ 石油・天然ガスは流体、坑井の掘削で一定量が長期生産可能（数年～数十年）⇒ 鉱床
- ・ 石油・天然ガス鉱床は地下に存在⇒地下をイメージングする評価(地下評価)が鍵

石油・天然ガス鉱床と堆積盆地

堆積盆地（ベースン: sedimentary basin）

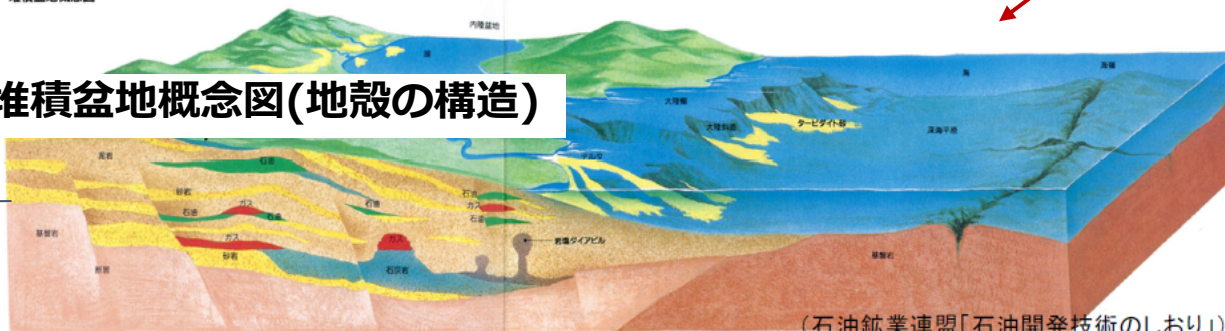
地球上（地表、海域）には一定期間、沈降あるいは隆起傾向が継続している地域が存在。

このうち、沈降の傾向を持続し、その間にかなりの厚さの堆積物が累積した地域を堆積盆地と呼ぶ。

そこに発達する堆積物の種類、量、規模、および堆積盆地のタイプなどがその堆積盆地の石油ポテンシャルを評価する際の基本的な要素となる。（JOGMEC 石油・天然ガス用語辞典）

堆積盆地概念図

堆積盆地概念図(地殻の構造)

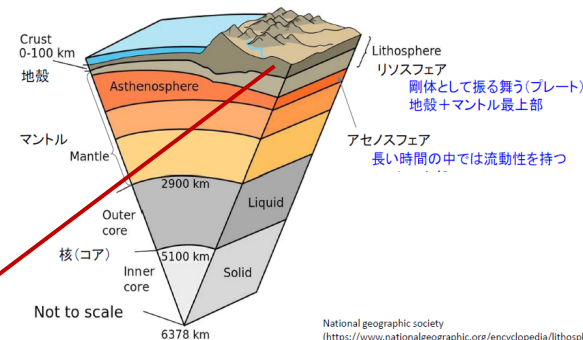


（石油鉱業連盟「石油開発技術のしおり」）

<https://www.japt.org/abc/a/gijutu/kongen.html>

地球の内部構造

・リソスフェア（プレート）は幾つかのブロックに分かれ、マントルの定常的な対流に乗って、移動している（プレートテクトニクス）



National geographic society
(<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/lithosphere/>)

National geographic Society
(<https://nationalgeographic.org/encyclopedia/lithosphere/>)

石油・天然ガス鉱床は地球の表面を覆う地殻上部の堆積盆地(主に堆積岩)に存在

補足：堆積岩は軽い花崗岩質、基盤岩は重い玄武岩質で比重が異なる。マントル最上部はさらに重いカンラン岩質

堆積盆地の地下で石油・天然ガス鉱床はどこにあるのか？

油・ガス田形成に必要な5つの条件

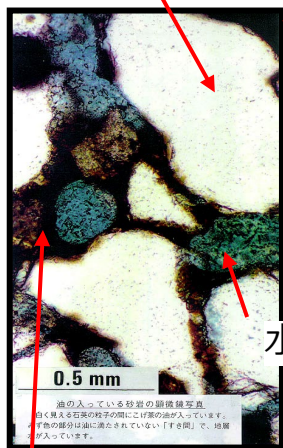
4. クロージャーの存在

油・ガスが貯まる閉じた地質構造

3.貯留岩の存在

油・ガスが貯まる岩石

砂粒（岩石の粒子）



水

原油やガス

5.油・ガスの保持

油・ガスの上昇を抑え込む

模式断面図
は横軸を圧縮したもの

2.油・ガスの移動集積

(油・ガスは水より軽い！)

油・ガスが集積される

1. 熟成根源岩の存在

油・ガスが作られる。排出された油・ガス量はベースンモデルで推定

出典：Quantitative geologic risk evaluation and expected net present value evaluation in JNOC's projects、中西、2000

貯留岩（流体は岩石の隙間に！）

油・ガスを貯えるのに十分な孔隙を持ち、浸透性の高い岩石

根源岩(source rock)の要件

- ✓有機物量が多いこと
- ✓有機物の質が良いこと(効率よく炭化水素を生成)



雷等により
自然発火も！

有機物に富む
岩石は一般的
に黒っぽい



ジュラ系Kimmeridge頁岩の模式露頭

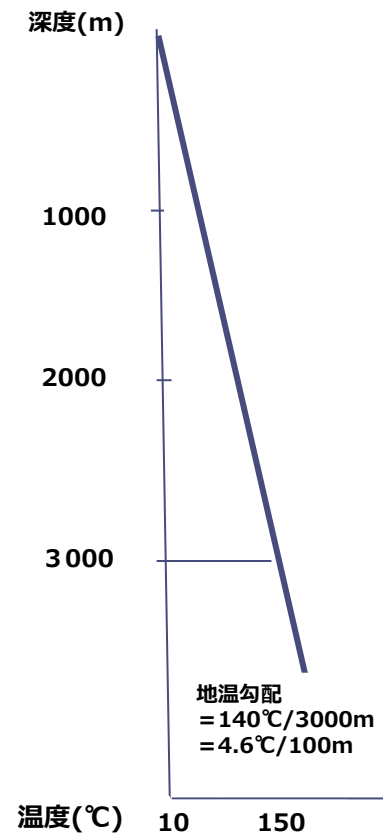
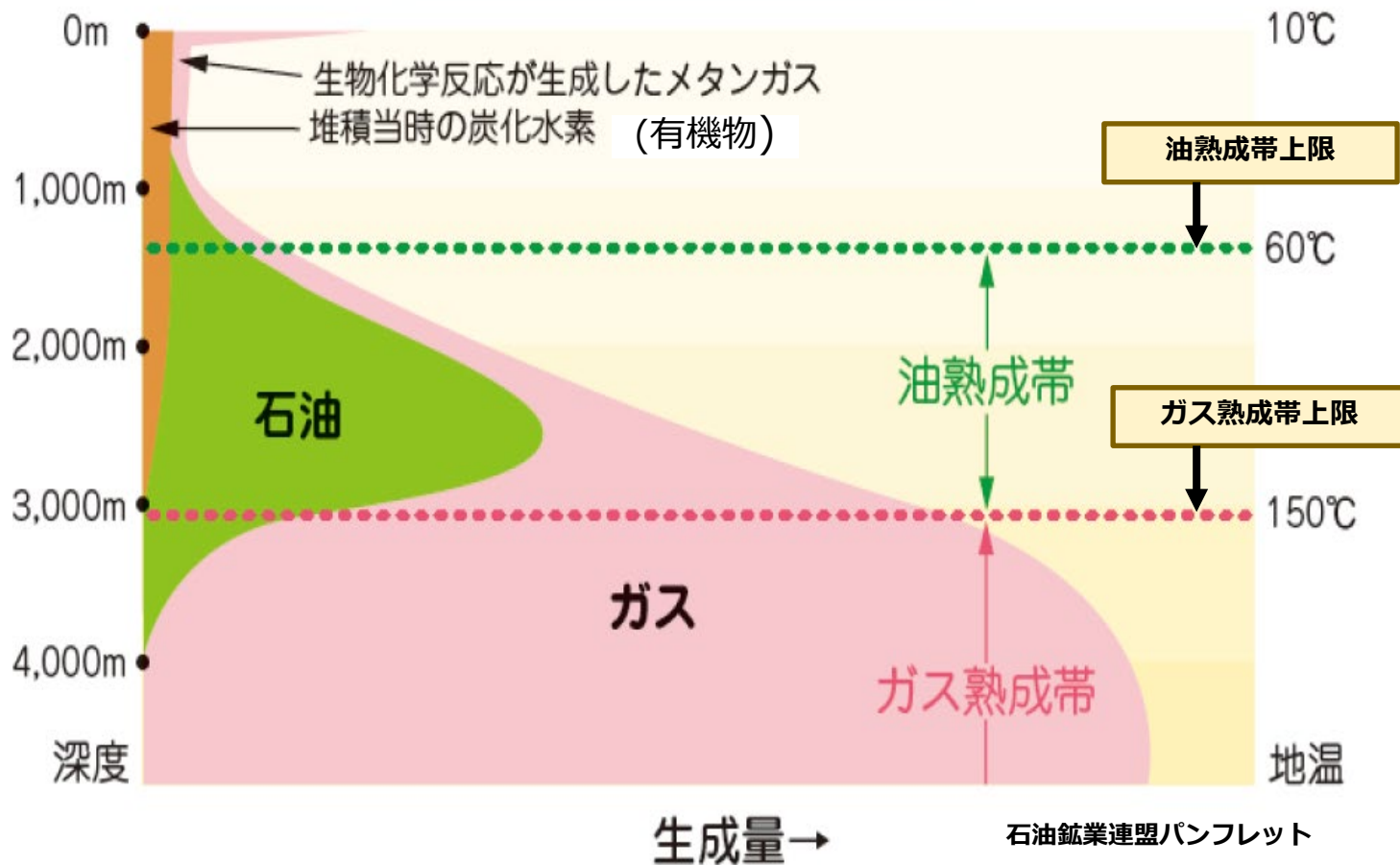
<http://www.southampton.ac.uk/~imw/Kimmeridge-Oil-Shale.htm>

- ・露頭の多くは地下で圧密を受けた後、地殻変動で地上に隆起したもの
- ・露頭観察・調査で根源岩存在他の端緒を見つける

根源岩の熱による熟成と石油・天然ガスの生成

深度・地温と炭化水素の生成量

左図の地温勾配



出典:左図を基に報告者作成

炭化水素(有機物の死骸等)が**温度(+圧力)の上昇**により**油・ガスを生成**。上左図では油熟成帯の上限はほぼ60°C(一般的には80°C位)、ガス熟成帯の上限はほぼ150°C。この上限深度は**地温勾配**に依存し、地温勾配は**堆積盆地のタイプ**や**岩相**に**依存**。一般的には1.5~5°C/100m (出典:JOGMEC)。石油開発で対象となる深度はおおよそ6000m以浅(高深度は貯留岩性状の劣化、高掘削コストで対象外)

良質根源岩の堆積場：プレートの復元による閉塞水域の特定

プレート復元による過去の地球の姿



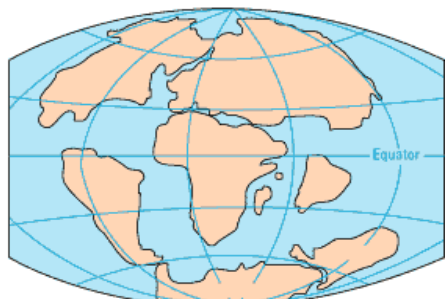
二畳紀末(2億5200万年前)



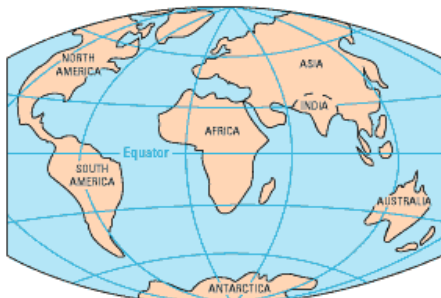
三畳紀末(2億年前)



ジュラ紀後期(1億3500年前)



白亜紀末(6500万年前)



現在

有機物は海水の循環により酸化分解



海水の循環が少ない閉鎖的環境であれば酸化分解されずに良質の根源岩が堆積



プレートの復元による良質根源岩の堆積場を特定

⇒各地質時代のプレートの境界付近に注目！

良質根源岩の発達の例

白亜紀中期(Middle Cretaceous) (約 1 億年前)

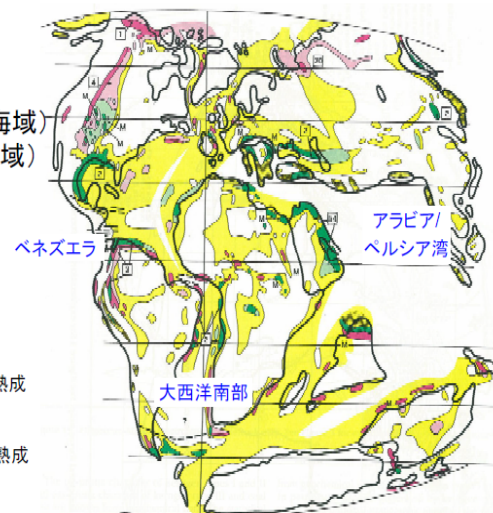
代表地域

アラビア/ペルシア湾沿岸

(閉鎖海域)

大西洋南部(リフト～閉鎖海域)

ベネズエラ(リフト～閉鎖海域)



油指向型根源岩
(oil prone)

熟成～過熟成
未熟成

ガス指向型根源岩
(gas prone)

熟成～過熟成
未熟成

Klemme and Ulmishek (1991)

出典：Effective petroleum source rocks of the world, AAPG Bulletin 75-12, Klemme & Ulmishek, 1991

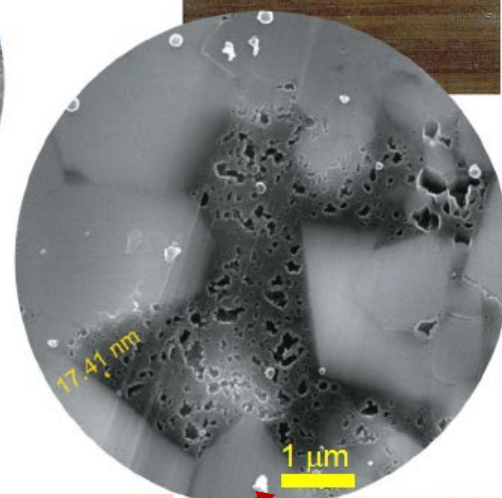
貯留岩の種類

近年では、頁岩(shale)からの油ガス生産も…
但し、孔隙のサイズは小規模で流動性も小さい

Eagleford shale
(<http://www.beg.utexas.edu/research/programs/starr/unconventional-resources/eagleford>)

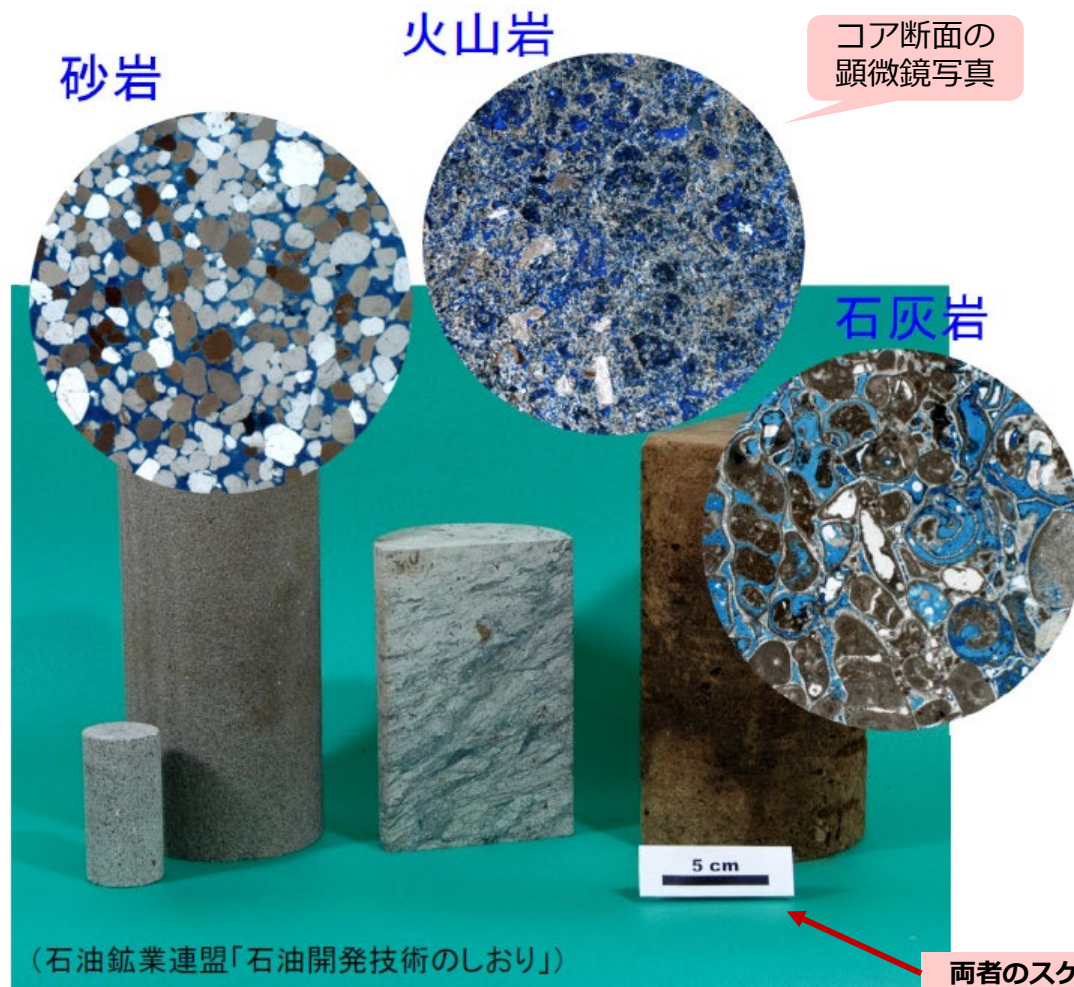
頁岩
(Eagleford, Texas)

コア断面の
顕微鏡写真



Driskill et al. (2013)

両者のスケールに注目!



(石油鉱業連盟「石油開発技術のしおり」)

- ・ **砂岩**では粒ぞろいの円磨度が進んだ**石英質砂岩**が**良好な貯留岩性状**
- ・ **砂岩**の粒子は主に**石英** (SiO_2)や長石類の**ケイ酸塩**
石灰岩の粒子は主に**カルサイト** (CaCO_3)

出典 : Application of SEM imaging to reservoir characterization in the Eagle Ford Shale, Driskill et al., 2013

貯留岩の条件

地下に存在し、油やガスを貯えることのできる**多孔質**でかつ**浸透性**が高く、ある程度の広がりを持つ岩石

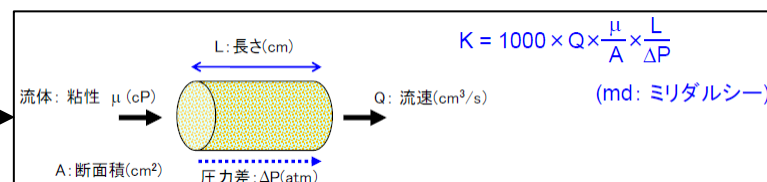
Class	Range of Porosity (%)
Negligible	0 - 5
Poor	5 - 10
Fair	10 - 15
Good	15 - 20
Very good	20 - 25
Exceptional	25 +

通常取りうる孔隙率値の範囲と評価基準(あくまで目安)

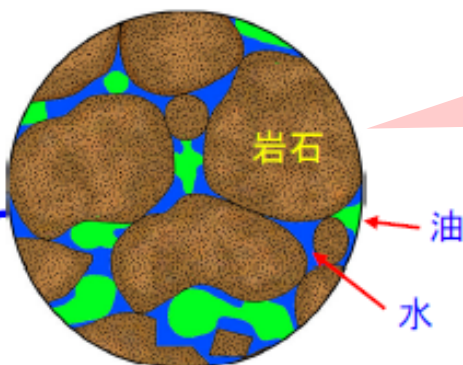
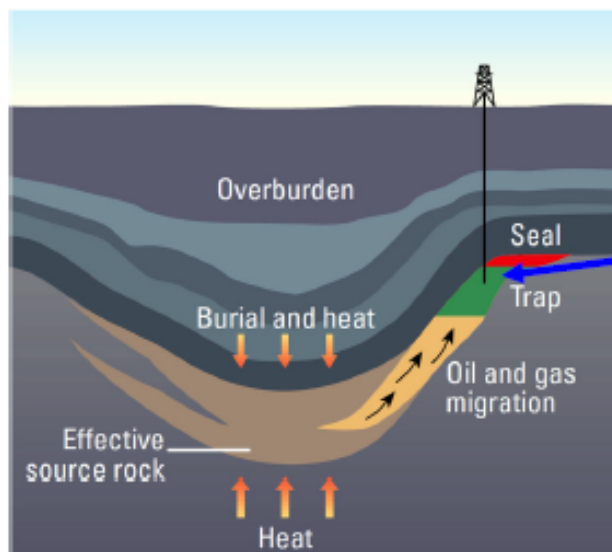
Shepherd (2009)

① 孔隙率: Porosity ...貯留能力

② 浸透率: Permeability ...生産能力



③ 規模・形状(厚さ、広がり、連続性) ...埋蔵量、生産能力



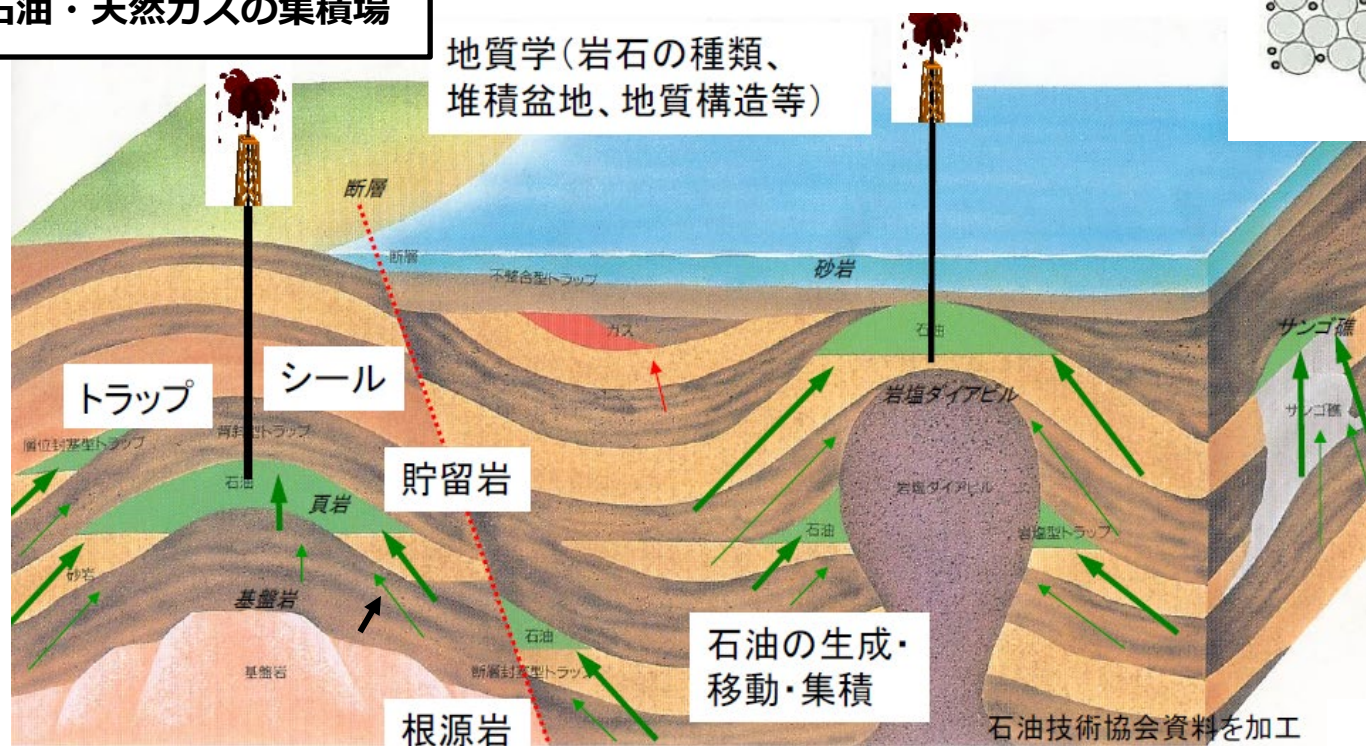
コアの断面を見ると、鉱物等からなる**岩石の粒子**と**流体**(石油、ガス、水)が存在する**孔隙(Φ)**とからなる。孔隙に占める水の割合は**水飽和率(S_w)**

石油・天然ガス鉱床を保持するトラップ形態 ～目に見えない地下構造のイメージ～

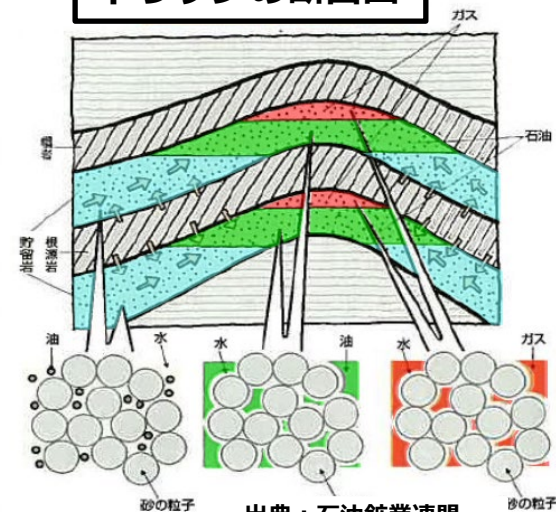
下図イメージは横軸を圧縮したもの

石油・天然ガスの集積場

地質学(岩石の種類、
堆積盆地、地質構造等)



トラップの断面図



出典：石油鉱業連盟

トラップの形態は主として、①**背斜構造**(地下の構造運動により形成)、②**岩塩ダイアピル**(岩塩は上位層の荷重により層内移動し断層等の弱線を通り道としてダイアピル等を形成)、③**層位** (サンゴ礁等) に分類

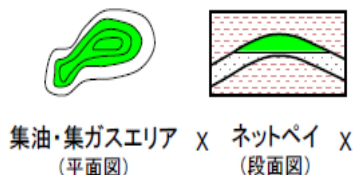
埋蔵量(資源量)(*)算定手法

1. 容積法 (鉱区評価～開発初期段階)
2. 実績に基づく方法 (生産段階)
 - ・ 物質収支法(Material balance):生産に伴う圧力挙動
 - ・ 減退曲線法(Depreciation Curve Method):時間経過に伴う生産レート減退の傾向と最も良く一致する曲線、あるいは式によって予測

補足(*): 厳密には坑井の掘削によって確認され経済的に開発できるものを埋蔵量、経済的な開発が不明なものや坑井で確認されていないものは資源量という

<容積法での埋蔵量(資源量)算定手法>

貯留層容量(V)の算定

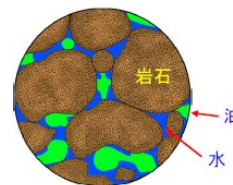


孔隙率(Φ)

$$\phi = \frac{V - V_s}{V} = \frac{V_p}{V} = \frac{\text{Pore Volume}}{\text{Total Bulk Volume}}$$



水飽和率(Sw)



容積係数(FVF)



回収率(R)



$$V(\text{集油面積} \times \text{油層厚}) \times \Phi(\text{孔隙率}) \times (1-SW)(\text{孔隙中の油率}) \div FVF(\text{容積係数}) \times R(\text{回収率})$$

原始埋蔵量(地下)

原始埋蔵量(地表)

可採埋蔵量

1. 石油・天然ガスとは

- (1) 一次エネルギーの分類、(2)石油の成分と分類
- (3) 石油・天然ガス産業の流れ(上流と下流)
- (4) 石油・天然ガスの利点と欠点

2. 石油・天然ガス鉱床

- (1) 鉱床を生みだす堆積盆地、(2) 鉱床成立の5要件、(3) 埋蔵量(資源量)評価

3. 上流開発の事業内容

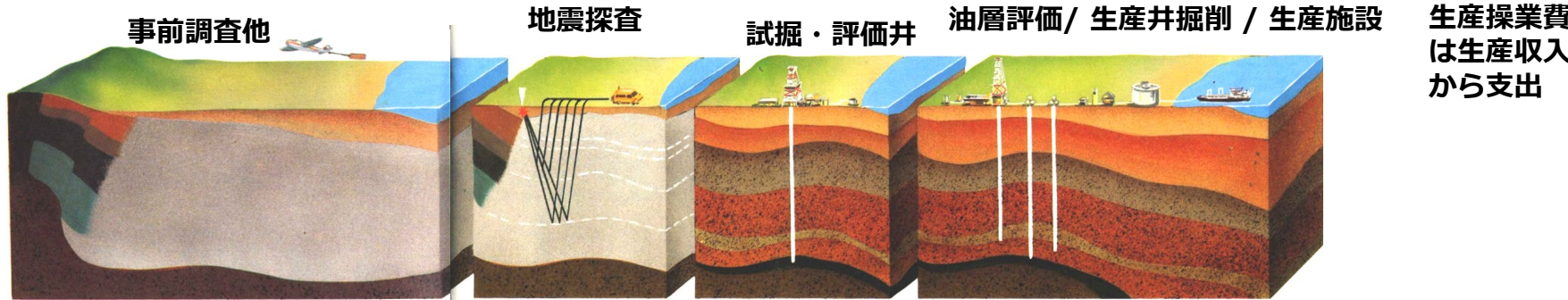
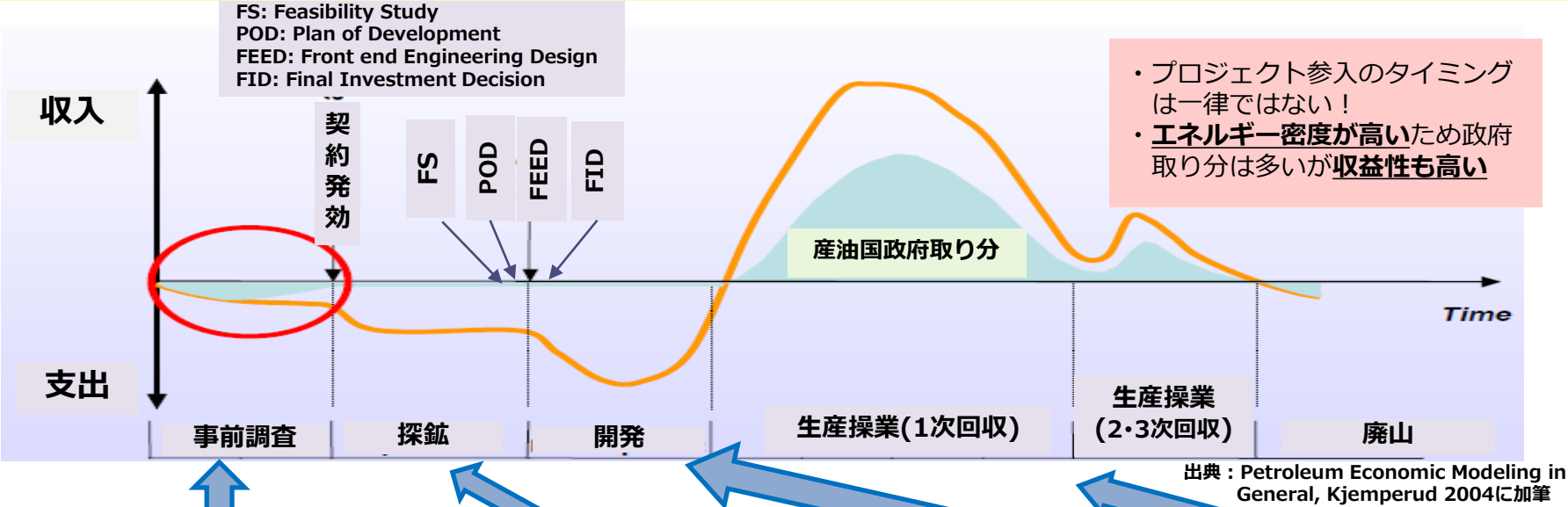
- (1) 探鉱・開発・生産作業の流れ、(2) 事前調査・鉱区取得、(3)物理探鉱
- (4) 坑井の掘削、(5) 開発作業、(6) 原油の二次回収と三次回収
- (7) CCS/CCUS導入の背景

4. 非在来型石油・天然ガス資源の開発

5. まとめ

上流開発事業の流れと収支のイメージ

- ・ **リスクビジネス**：探鉱段階で終結のプロジェクトが主（開発段階まで辿りつけるプロジェクトは約 1 割）
- ・ リスクは大きく **リードタイム(発見から生産までの期間)** も長いが、生産開始後の **リターンも大きい**

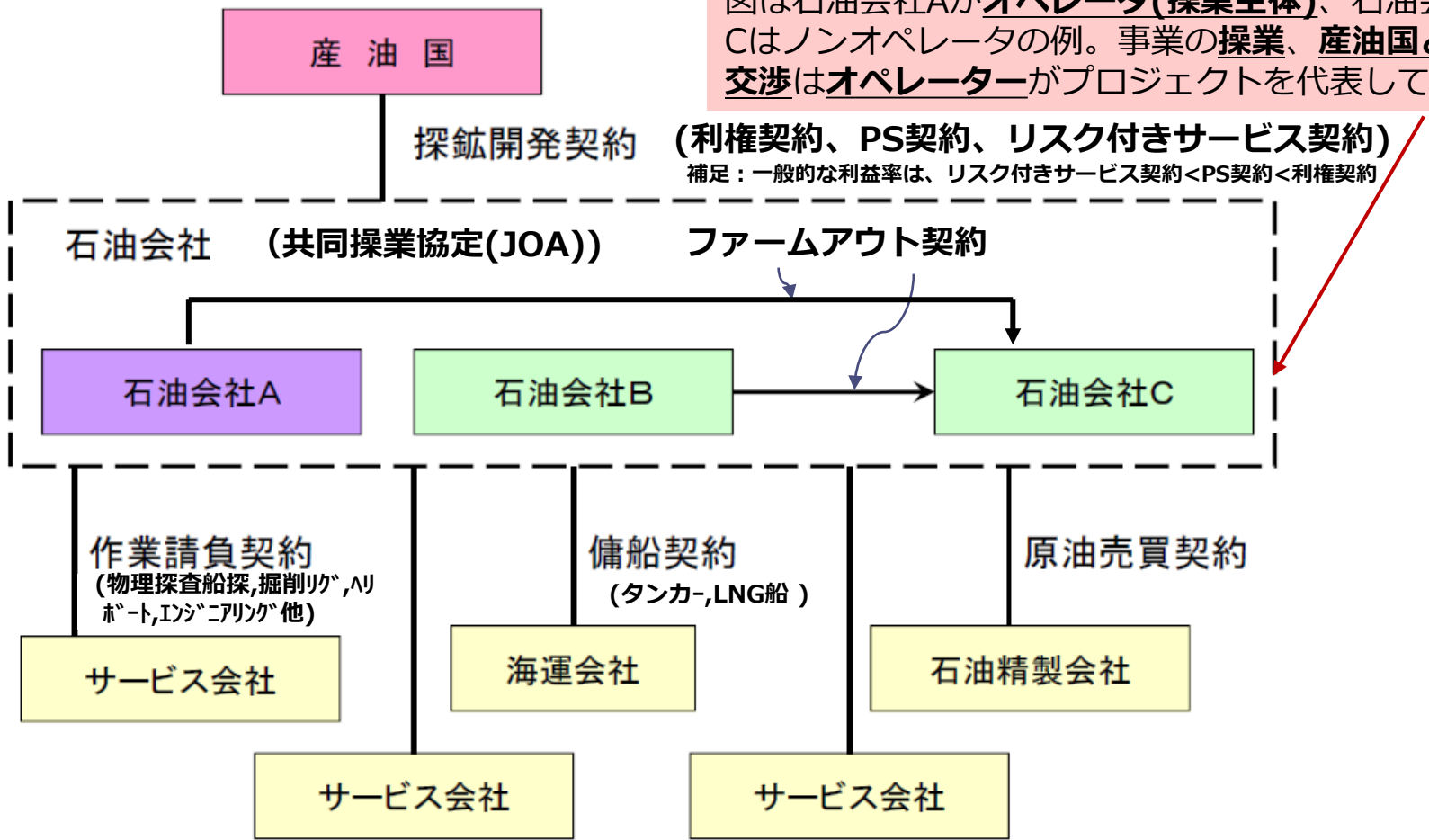


支出規模：1 億円～ 10 億円～ 100 億円～ 1000 億円～
(10万b/dクラスの油田開発の例)

沖合巨大ガス田開発の場合、開発費用が数兆円プロジェクトも！

上流開発事業のプロジェクト組成、契約形態の概念図

上流事業では投資額が大きいので、他社とコンソーシアムを組むプロジェクト参加のケースが殆ど。下図は石油会社Aがオペレータ(操業主体)、石油会社B、Cはノンオペレータの例。事業の操業、産油国との交渉はオペレーターがプロジェクトを代表して実施



・産油国(産油国政府、産油国国営石油会社)と石油会社が結ぶ契約(探鉱開発契約)は全て成果に応じたリスク付き。石油会社とサービス会社(地質コンサル、物探、掘削リグ、検層、傭船、ヘリ、エンジニアリング他)とが結ぶ作業請負契約は、作業量に応じたリスクなし契約。その他、石油会社は資金調達で金融機関と融資契約も締結
→石油上流会社の力は、技術力(産油国や競合石油会社との交渉力、適切なサービス会社の選定と管理、埋蔵量等の地下評価能力、プロジェクト計画の策定・運営、スケジュール・予算管理)と資金力(資金調達力)の総合力

事前調査・鉱区取得

ベネズエラでの地質露頭調査



コロンビア国営石油会社との交渉



コンサルタントとの技術評価



ベネズエラでのテレビ取材



コロンビアでの操業油田視察



中国新疆ウイグル自治区の
天山山脈での地質露頭調査



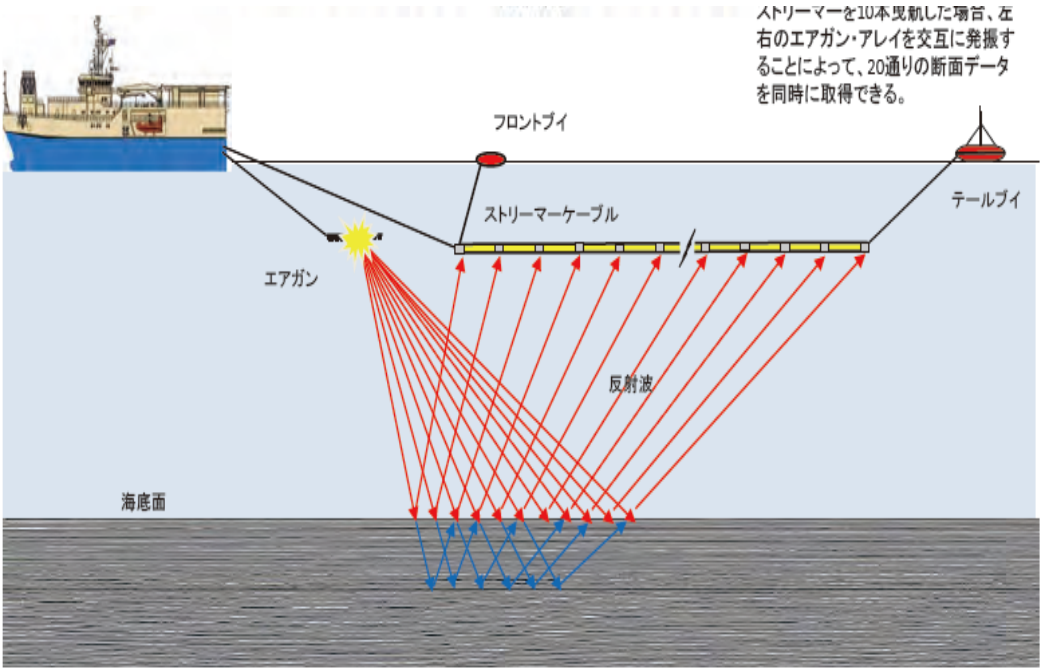
出典：講師提供

鉱区(地下資源を採鉱・開発・生産できる区域、**採鉱期間**(3年程度、延長可、Max.10年程度)、**開発・生産期間**(20年程度、延長可)、1 鉱区面積はおおよそ**数百km²~数千km²**、取得方法は産油国の**入札(義務作業量、サインボーナスや政府取り分の多寡等が競争条件)**か、産油国/権益保持者との**直接交渉**

物理探鉱～地震探査とは～

人工的に発生させた振動（弾性波）が下方に進行し、物性(速度と密度)が変化する地下境界面で反射し(一部透過)、再び地表(海上)に戻ってきたところを受振器（地震計）で捉え、収録された記録を処理・解析することにより地下の構造を解明する手法（P波を活用）。近年は貯留岩の性状(タイプ、孔隙率、孔隙内の流体等)の把握、分布にも適用（P波、S波を活用）

地震探鉱データ収録概念図



出典：JOGMEC、2004

石油の探鉱・開発では鉱区(数百km²～数千km²)のデータ取得のため地震探査は物理探鉱としては必須だが、探査費用も高額！

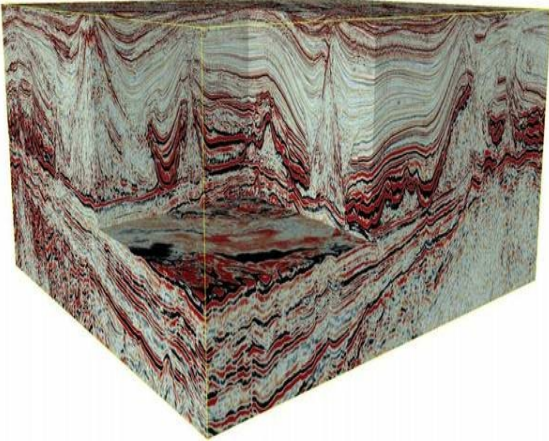
補足:他の物理探鉱種目として、安価な重磁力探査、比抵抗探査、リモートセンシング等も活用するが、主要種目は地震探査

物探船



出典：Ranform Atlas、PGSホームページ

3D(3次元)震探画像イメージ



出典：ブラジル沖の3D、Offshore Engineeringのホームページより、オリジナルはION

物理探鉱：反射法地震探査データ収録と処理作業



バイブレーター(非爆薬震源)

出典：演者提供(@タクラマカン砂漠)



物探船

出典：Ranform Atlas、PGSホームページ

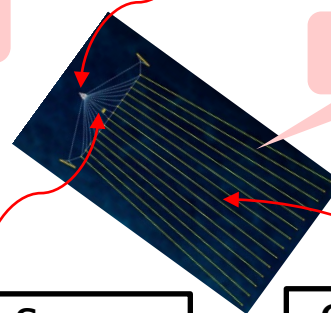
地震波の測定(収録)

- ・貯留層の深度と広がり、層厚を探查
深度：数100m～数1000m
広がり：**数km²～数100km²**
層厚：数10m～数100m

・測定 機器、データ処理手法、解析手法に汎用性があるため、探查を実施する環境を問わない。

世界最大のガウル油田の大きさは南北約280km、東西約50km

受振器の長さは6km～10km

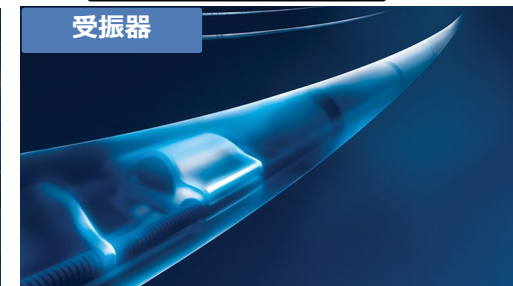


Marine Seismic Sources

GeoStreamer



発振器



受振器

出典：PGSホームページ

波形の処理作業

- ・大型計算機による計算処理を行い、解釈に適した断面図を作成。
- ・最適な処理フローを構築する。
- ・大規模3Dの場合には、作業に約1年を要する。

坑井の掘削

油・ガス胚胎の有無を調べるために、地質・物理探鉱評価作業により有望と判断した場所に試掘井を掘削する。



<https://www.teiseki-drilling.co.jp/chinetu/chinetsu-00.html>



出典 : shikiho.jp



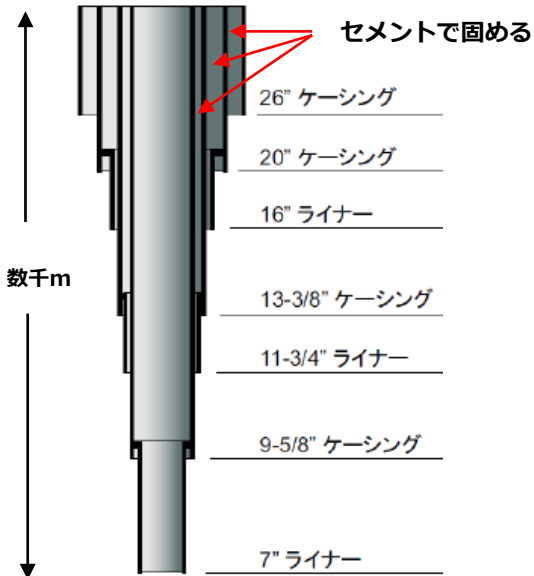
出典 : JDCホームページ

坑井(井戸)を掘らないと油・ガスは確認できない！

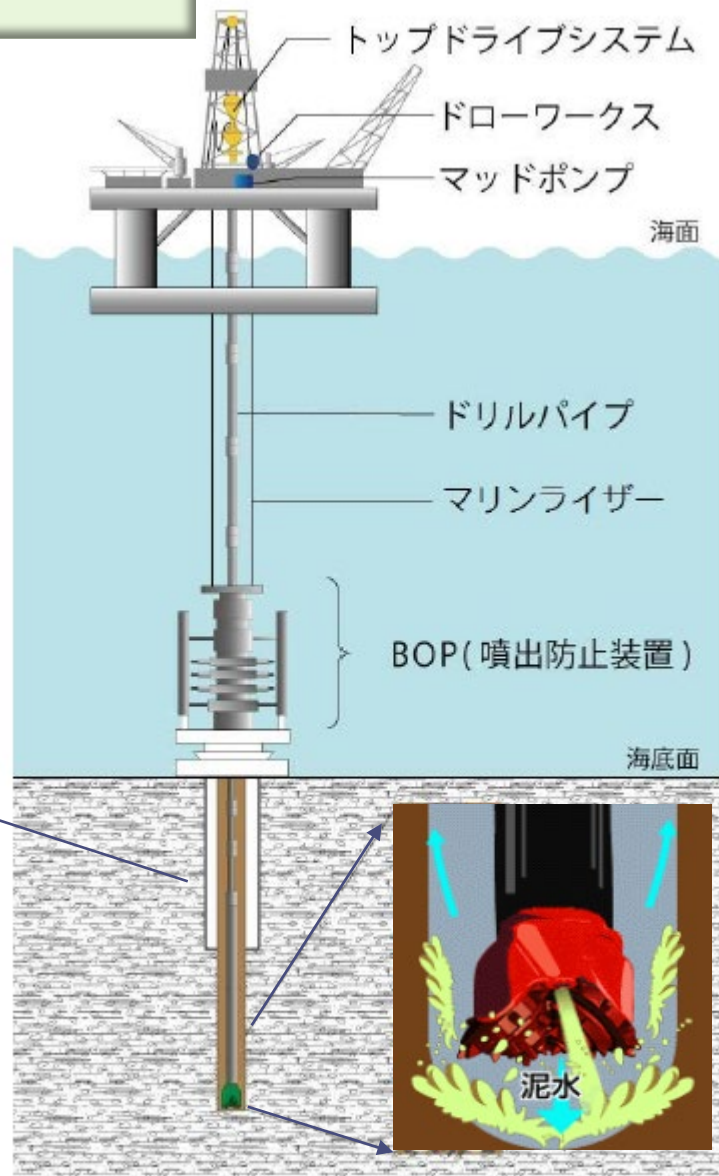
掘削の概念図

石油・天然ガスの存在を確認する坑井は試掘井、広がりを確認する坑井は評価井、生産する井戸は生産井と呼ぶ

掘削孔の断面図 ～ケーシング計画の一例～



出典：石油開発時No.150



出典：日本海洋掘削㈱ホームページに一部加工

ドリリングビット



出典：Schlumbergerホームページ

コアビット断面図

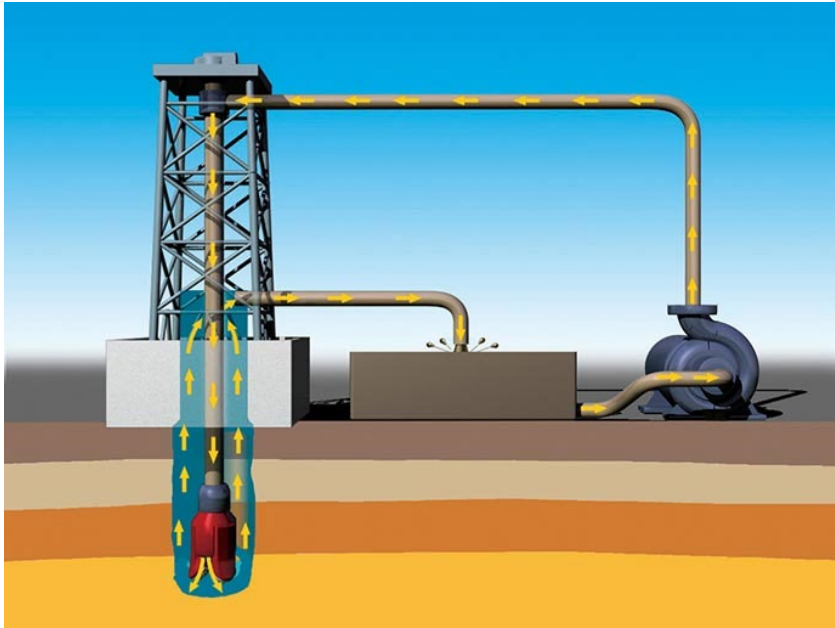


先端にダイヤモンド
モンド

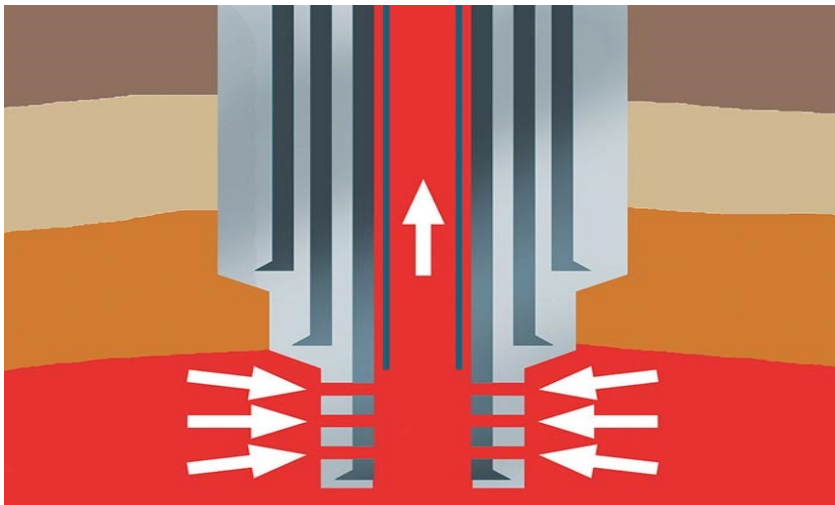
出典：Diamantinachristensen
ホームページ

- ・ ドリルパイプ (径:10 数cm)の先端に取り付けたビットを回転させ岩石を砕き掘進
- ・ ドリルパイプは1本 9m。これを繋ぎ合わせ目的層まで掘削
- ・ 掘削孔壁の崩壊防止のため、ケーシングをセット

掘削坑内の概念図



- 掘削期間中、泥水(Mud)が坑内循環
- 泥水の役目
 - ① 掘り屑(カッティングス)の回収：
掘り屑は坑内を循環する泥水とともに掘削装置(リグ)上で回収。カッティングスは重要な地下データ
 - ② 圧力維持：地下の流体の圧力はほぼ静水圧(10m深くなるごとにほぼ1気圧上昇)。圧力維持が出来ないと地下流体が地上に噴き出す暴噴リスクが高まる
 - ③ 孔壁崩壊の防止



- 掘削終了後、ケーシング(orチュービング)に爆薬で穴をあけ(仕上げ)、対象層から石油・天然ガスを生産

掘削エンジニアリング

掘削コスト抑制と生産能力向上を考慮した掘削装置(リグ)選定と掘削計画策定

- リグの選定
- 坑井のタイプ (水平坑井、マルチラテラル坑井など)
- 坑井のサイズ、仕上げの方法、 etc...

Jack-up
水深～120m

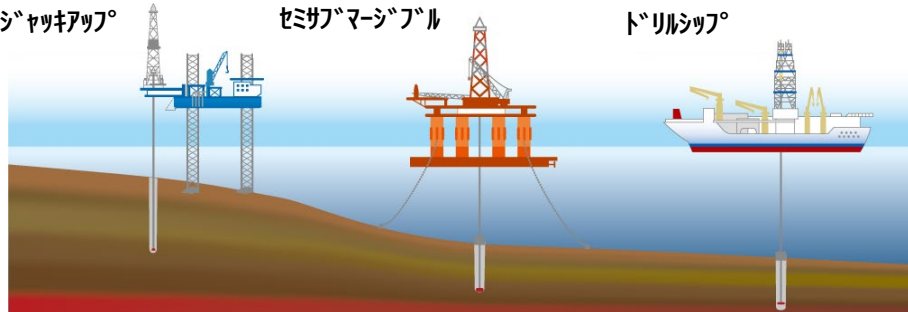
Semi-submersible
水深100m～

Drill Ship
水深1500m～

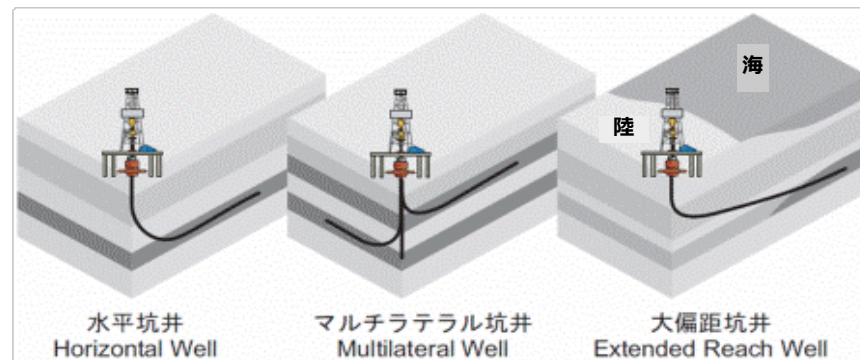
ジャッキアップ

セミサブマージブル

ドリルシップ



出典：JDC日本海洋掘削(株)ホームページ



垂直坑井に比べて水平坑井の方が
貯留層と接する部分が多く、より高い
生産性が期待できる。

海洋掘削リグの単価(リグレート(*)、
1日の使用料)は高額(数千万円)！

補足: 台風退船等、作業ができない場合
でもリグ傭船費用は発生



出典：JDC日本海洋掘削(株)



出典：JDC日本海洋掘削(株)



出典：JDC日本海洋掘削(株)

©JAMSTEC

Jack-up
(甲板昇降型海洋掘削装置)

Semi-submersible
(半潜水型海洋掘削装置)

Drill Ship
(浮遊型海洋掘削装置)

掘削中のデータ取得：物理(電気)検層と坑井テスト

物理検層

坑内に測定機器を降ろし、地層の物性（比抵抗、音波速度、ガンマ線強度など）を調べることで、地下状況（岩相・流体・温度・圧力など）を把握する。

検層機器
(検層ツールス)



砂岩層(貯留層)と頁岩とを判別

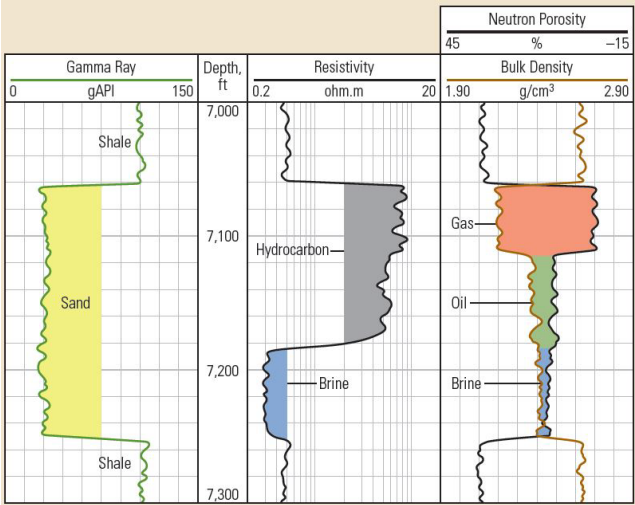
ガンマ線

油・ガス層と水層とを判別

比抵抗

油層とガス層とを判別

孔隙率・密度



浅↑ 深度 ↓ 深

出典：Schlumbergerホームページ

坑井テスト

坑井テストにより坑井の産出能力、油・ガス層の性質（圧力、浸透率など）、坑井周辺の状態（生産障害の程度）、地層の連続性等、油・ガス田開発に重要な情報を得ることが目的。

油・ガス層の判別は物理検層で、最終確認は坑井テストで！

補足:環境に配慮し、現在ではフレアさせるのは仕上げ後の短時間に限定



出典：INPEXホームページ

開発のための可採埋蔵量評価の流れ ～シミュレーションモデルによる評価～

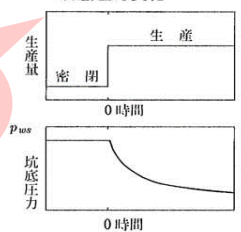
- 油・ガスの原始埋蔵量を推定
- 原始埋蔵量に対して回収できる油・ガスの割合（回収率）を検討

コア（岩石）・
PVT（流体）データ



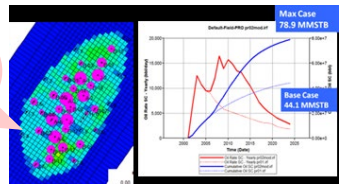
圧力データにより、生産挙動や生産能力を把握

坑井テストデータ



坑井本数や配置から生産量予測

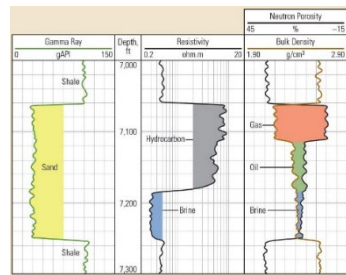
シミュレーションモデル



出典：JOEホームページ

出典：石油網領連盟「石油開発のしおり」

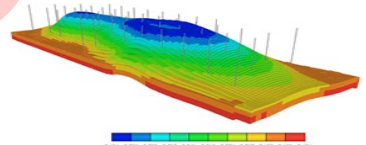
検層データ



出典：Schlumbergerホームページ

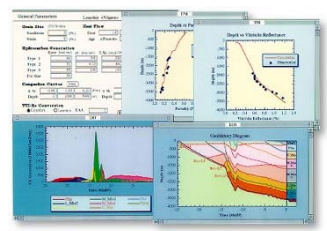
検層データにより、油・ガスの存在を把握

震探データ



出典：JOEホームページ

地質データ



出典：JGIホームページ

回収率の見積もり(可採埋蔵量の算定)は埋蔵量評価で重要事項。坑井テストからの圧力データを活用し、坑井の本数、配置からシミュレーションモデルで生産量予測

探鉱と開発・生産との違い

- ・ 探鉱は出資金(リスクマネー)で、大規模投資が必要な開発は会社の資金規模に応じて多くは融資金(返済が必要)を活用！
→内外の金融機関との融資計画交渉
- ・ 探鉱への出資金(リスクマネー)は小規模(他の業界と比べると大規模)で、その不成功で会社経営を傾けることは無いが、開発の投下資金は大規模で開発の失敗は会社経営に大きな打撃を与える場合もある(資金規模の巨大なメジャーは別として、中～小規模の石油会社では開発の失敗は許されない！)
- ・ 生産は金を生む！
- ・ 開発段階からのプロジェクトへの関与：雇用問題、ローカルコンテンツ(主の地元企業の活用、雇用)等から、産油国中央政府や地方政府（許認可等）との調整に加え、反政府組織、ゲリラ組織、環境団体を利用した組織等からの関与（ゆすり、たかりの類）は、探鉱段階と比べ開発段階からは比較にならないほど多い！

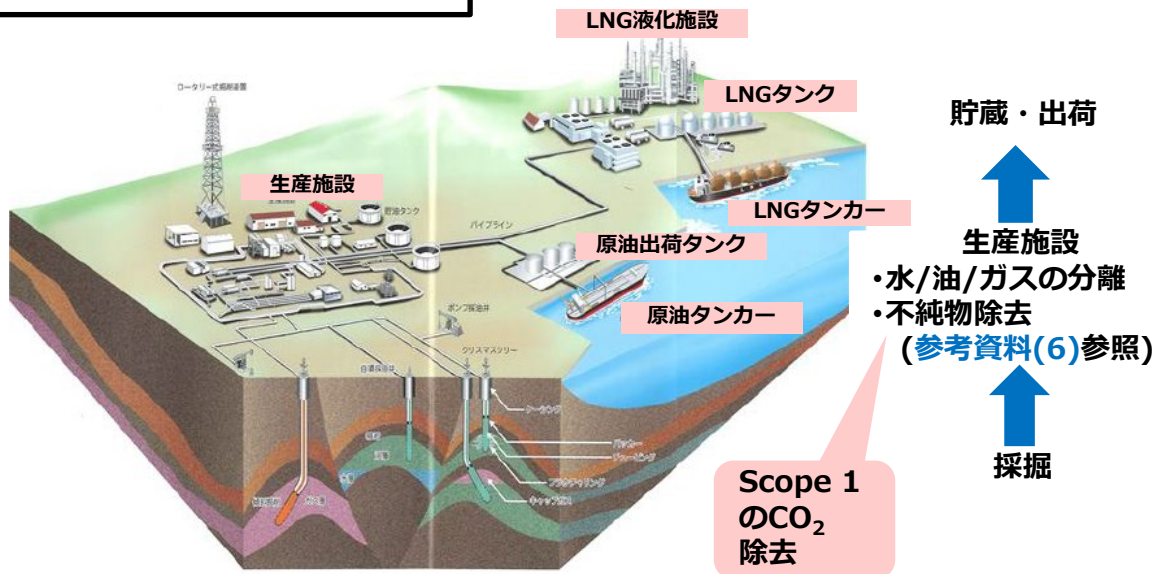
補足:探鉱から開発準備、開発フェーズへの移行の流れについては[参考資料\(5\)](#)参照

開発の失敗は許されない

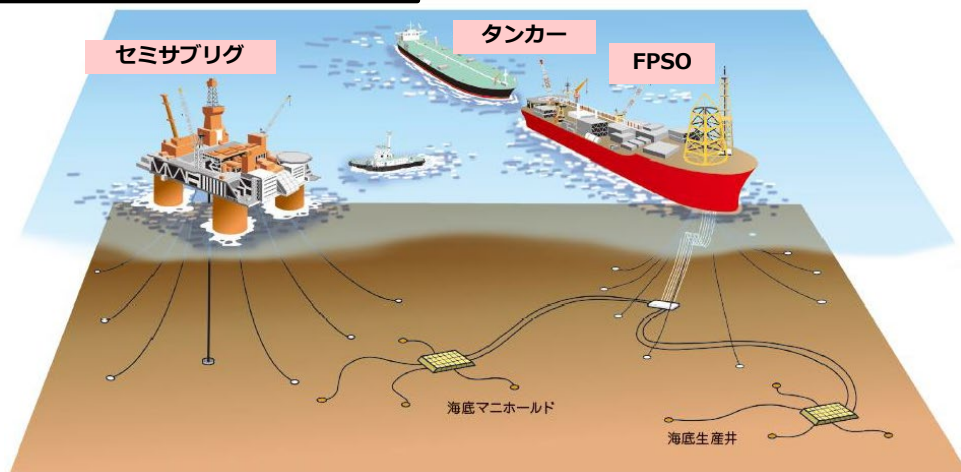
→FID(最終投資決定)はより慎重に、Challengingであってはならない！

開発概念設計(コンセプトセレクション)

陸上の開発概念



海上の開発概念



出典：石油鉱業連盟パンフレット

FSによる検討項目

石油・天然ガス田開発の青写真を描く

- ① 可採埋蔵量の評価・生産量予測(何を・どこから・どのように生産するのか)
- ② 開発コンセプトの検討(どのような施設を建設・出荷するか)
- ③ 開発費と生産コストの見積もり
マーケット調査
- ④ 環境保全・保安(*)の検討(気象海象調査・生物環境調査、プラントの安全性調査等)

補足(*):石油上流産業は国際ビジネスのため事業は基本的に国際基準を適用

- ・ 開発概念設計によって投資額が大きく異なる
- ・ 一般的に陸上では規模の小さな油・ガス田も開発可能だが、海上の場合は坑井掘削コスト、開発施設建設コスト等が高額なため、ある程度大規模な油・ガス田でなければ開発不能

開発概念設計は投資総額を決める重要検討項目の一つ！

海洋油・ガス田の開発概念設計(コンセプトセレクション)



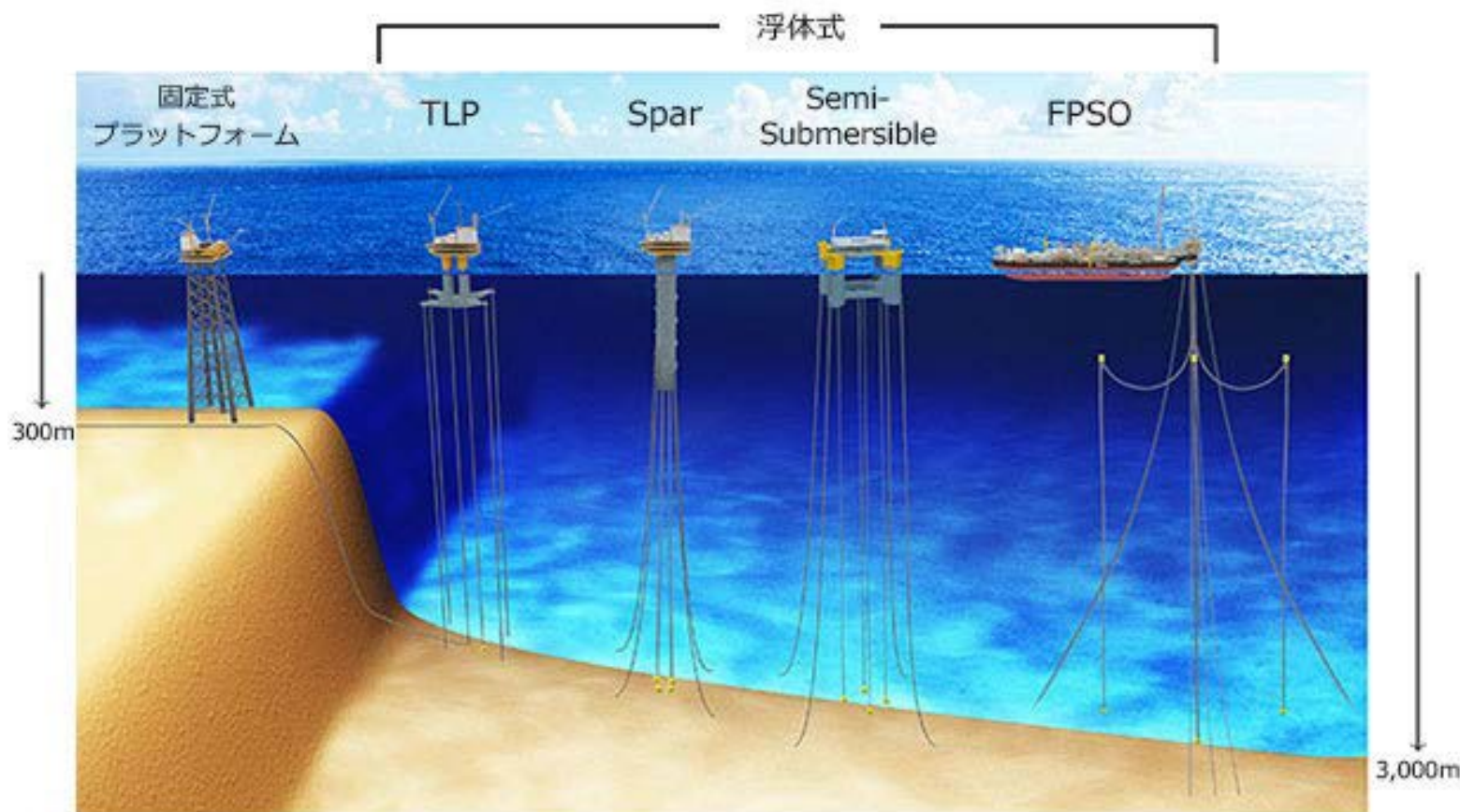
Identification of Criteria for Selection of Arctic Offshore Field Development concept, T.S.Gordeeva, University of Stavanger, 2013

- ・既存油・ガス田へのつなぎ込みか、単独開発かで開発概念設計が大きく異なる
- ・海洋油・ガス田の単独開発では、掘削、生産、処理、輸送システムが主な検討事項
- ・海洋ガス田の場合はこれに加え、パイプライン出荷かLNG(液化天然ガス)出荷かを検討(一般的にパイプラインの方が安価)。LNG出荷の場合は洋上開発(含：液化施設)かパイプラインで陸上まで輸送し陸上でガスを液化するかも検討。

→新規海洋LNGプロジェクト立ち上げは施設建造を含め長期間を要し、大規模投資が必要

海洋生産施設のタイプ

- 水深と使用目的により2つに大別：①海底に設置される**固定式**、②**浮体式**
- 浅海では人工島、氷海では重力プラットフォームもある
- **生産施設選定**に際しては**海象気象条件**(Metocean;波、風、潮流、水深、温度、津波、地震、海水等)、**掘削/貯蔵施設**の設置が可能か否かも考慮



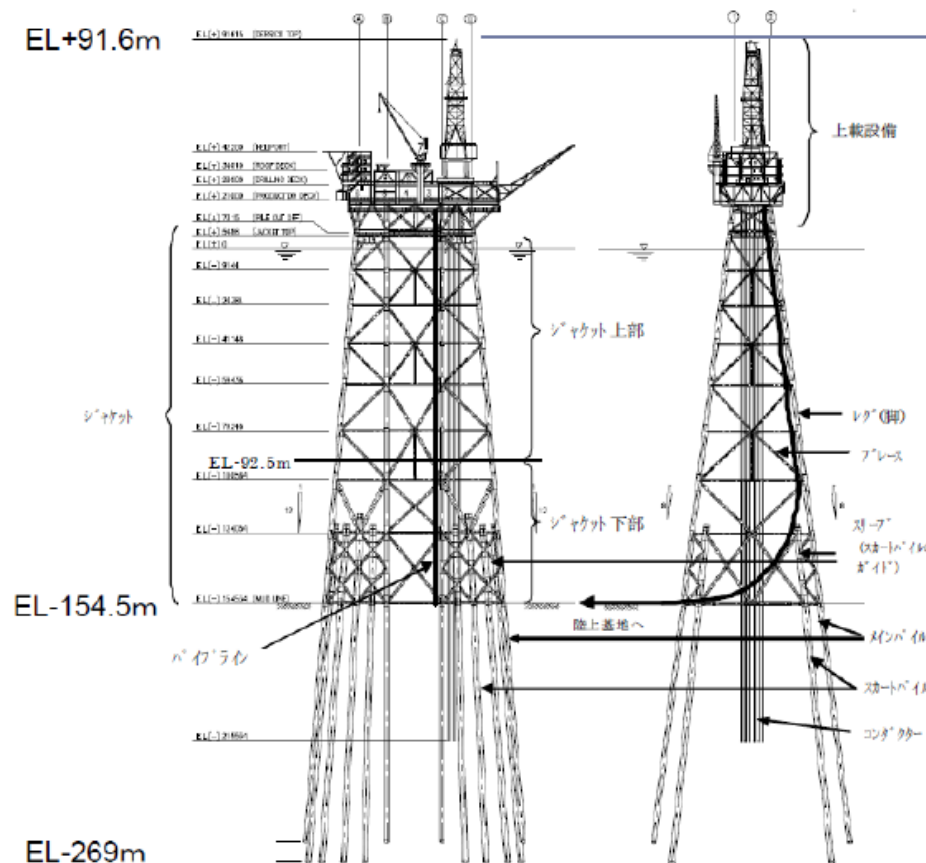
三井海洋開発(株)のウェブサイト

TLP : Tension leg Platform,

FPSO(浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備) : Floating Production Storage and Offloading System

固定式プラットフォーム(ジャケット)の概念図 ～磐城沖ガス田の例～

磐城沖ガス田の固定式プラットフォーム



東京タワーと
ほぼ同じ高さ

出典：海洋開発ビジネス、国交省

- ・ **磐城沖ガス田**：水深:154m、離岸距離:約40km
- ・ **1981年開発開始、1984年生産開始、2007年生産終了、2010年全撤去完了**

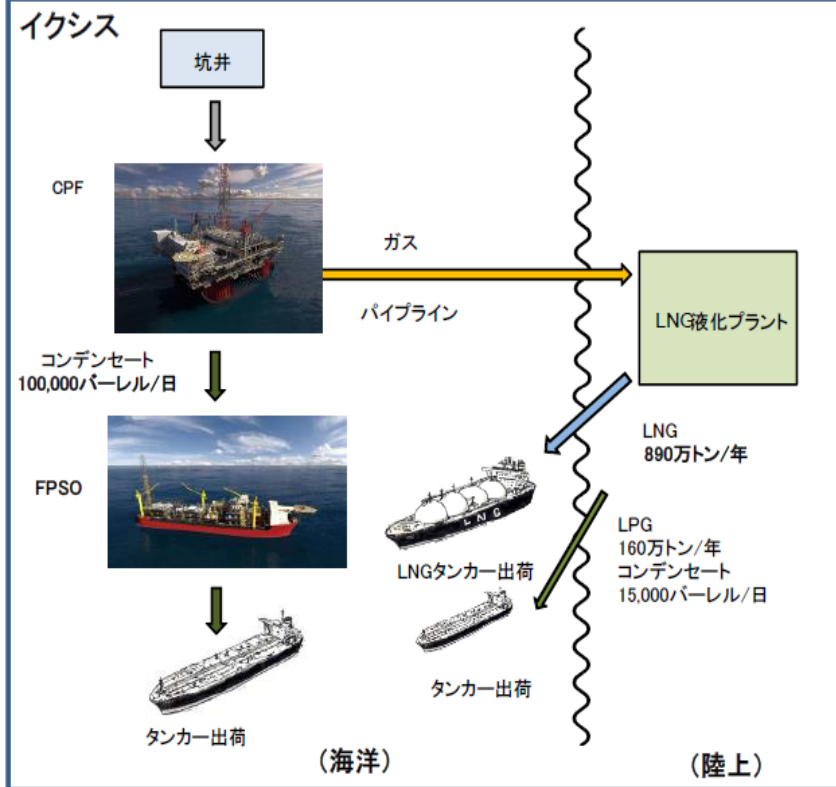
3.上流開発の事業内容

海洋ガス田開発コンセプト ～イクシスガス田の例～



<https://www.inpex.co.jp/ichthys/concept.html>

海洋建造物は**巨大**
→**建造費用**も**巨額**



イクシスCPF (Central Processing Facility)
Gas/Liquid Separation、Gas Dehydration & Export
イクシスFPSO (Floating, Production, Storage and Offloading)
Condensate/water separation, stabilisation, storage & tandem
offload; flash gas compression; MEG recovery & Injection

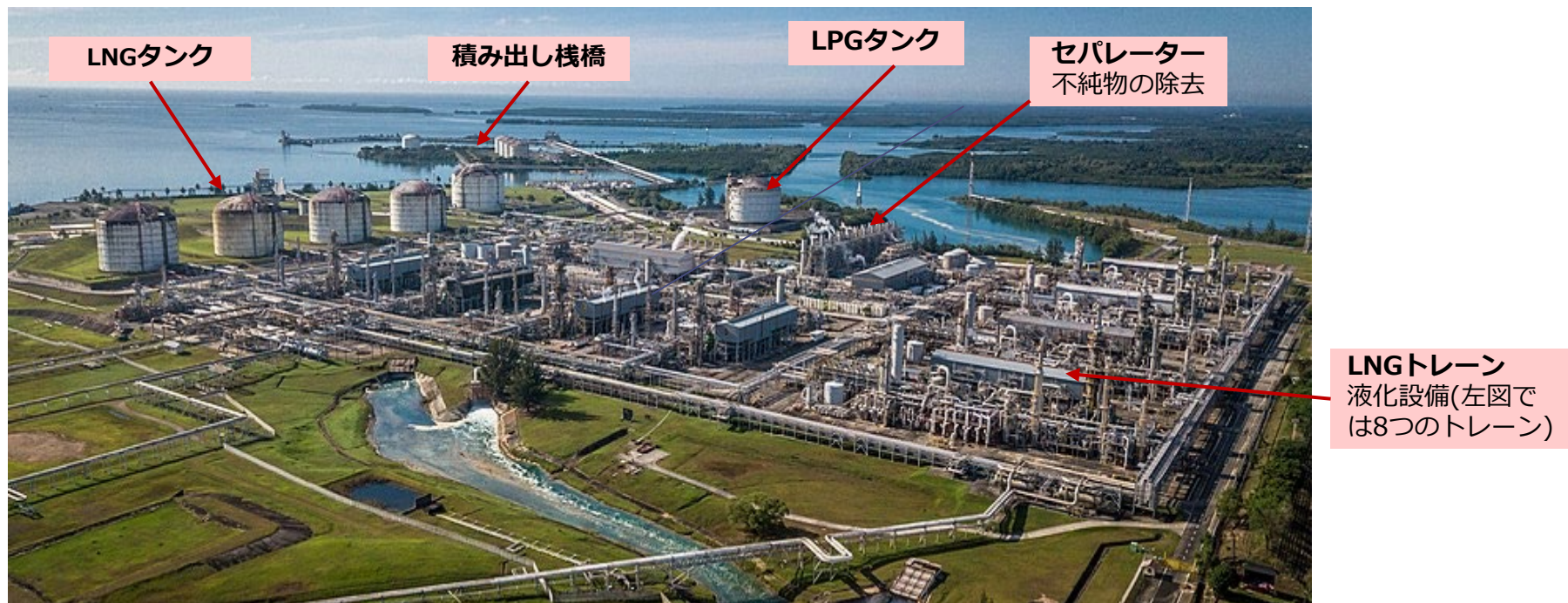
出典：INPEXホームページ他



<https://www.inpex.co.jp/ir/library/pdf/presentation/Presentation20180511-b.pdf>

イクシスガス田:2000年発見、2018年生産開始(水深約250m、地下3900m-4600m)、日本のガス消費の1/10を供給。生産ガスはCPFにてガスとコンデンセートに分離。ガスは水抜き後、海底パイプライン(890km)にてLNG液化プラントへ。LNG液化プラントでは、ガスを液化(-162℃)し消費地にLNGタンカー輸送。同時にコンデンセート・LPG(主成分はプロパン/ブタン)もタンカー輸送。

BadakのLNG液化施設(陸上)



出典 : Wikipedia

Badak LNG液化施設は**東カリマンタン**（ボルネオ島のインドネシア領）のボンタンに**1974年**に**設立**。2017年の収容人員は約1800名。東カリマンタン陸上、沖合で開発されたガスをパイプラインを通してBadak LNG液化施設まで輸送し、ここで液化したガスは主に海外に輸出。ボンタンにはオフィス(写真右上) の他に居住区、ゴルフ場、病院等も完備。敷地と現地との間はフェンス等で仕切られ、security完備。

FLNGの規模・概念

陸上 LNG 生産基地

広い敷地を
利用



Darwin LNG Plant

LNG生産プラントのイメージ



千代田化工建設

- ・小型化、ユニット化
- ・洋上環境への適応

FPSO

船長：
300~400m
船幅：
50~60m
価格：
約700億円



MODEC

上載プラントのイメージ



- ・LNG
対応
(生産、
液化、
防爆等)

大型LNG 運搬船

船長：
200~300m
船幅：
30~40m
価格：
約200億円



IHI

貨物タンク(角型独立タンク)



IHI

- ・船体大型化

FLNG



SHELL

船長：400~500m
船幅：50~80m
価格：約3000~6000億円

<http://www.hazardexonthenet.net/article/124072/Shell-Australia-s-giant-Prelude-floating-liquefied-natural-gas-project-likely-to-come-on-stream-in-2017.aspx>

海洋フロンティアへの挑戦、国土交通省海事局

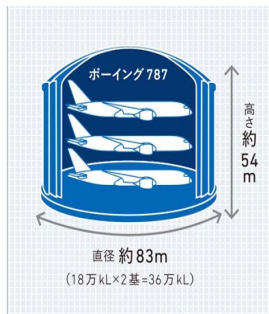
<FLNG(Floating LNG Production System ; 浮体式液化天然ガス生産設備)の特長>

- ・FLNGはガス分離施設に加え液化施設も備わった巨大施設。陸上での施設建設困難な場合に適用
- ・難点としてはスケールメリットが小(ある埋蔵量以上のガスではパイプライン/陸上液化施設の組み合わせの方が経済性が良好)。またローカルコンテンツの問題(産ガス国産の機器の使用、雇用での地元活用が少ない)

LNG受け入れ基地(液体→気化、出荷)の従来型(陸上)と浮体式

ビジネス機会の多様化で上流企業もLNG受け入れ基地建設事業に参画！

直江津の陸上LNG受け入れ基地



出典：(株)INPEXホームページ

FSRU(浮体式LNG受け入れ基地)



photo credit BOTAS

出典：MODECホームページ

LNG受け入れ事業(液体→気体、出荷)は従来下流に位置付けられていたが、**ガスバリューチェーン**の一環として上流企業のLNG受け入れ事業参加の機会が増大。沿岸部でのLNG受け入れ基地建設が主流ではあるが、エネルギー需要が急増する新興国を中心に浮体式LNG受け入れ基地を設置するケースも増大

<浮体式LNG受け入れ基地>2005年にメキシコ湾で最初に導入。以下の2つのタイプ

1. 浮体式貯蔵・再ガス化設備(**FSRU**：Floating Storage and Re-gasification Unit)
2. 浮体式再ガス化設備(**FRU**：Floating Re-gasification Unit)

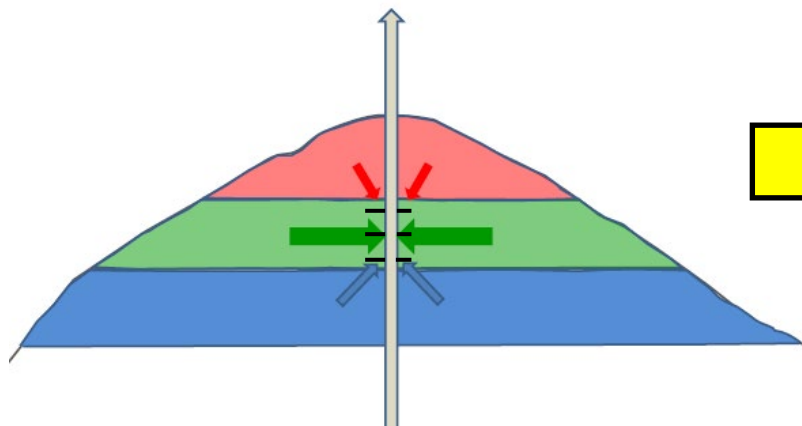
<浮体式LNG受け入れ基地のメリット>

- ① 着工から稼働までの期間が短い、② 初期コストが抑えられる
- ③ 移動・転用が容易

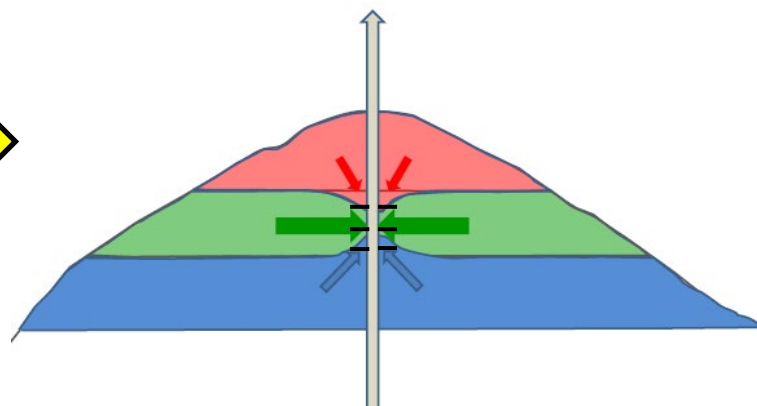
ロシアからの安価なパイプラインガス輸入減少により最近ではドイツでも高価な外国産LNG受け入れでFSRU導入。ガスの供給源は主に米国。このガスはもともとアジア方面をマーケットとしていたガス。

原油生産後期の問題

初期の油生産のイメージ



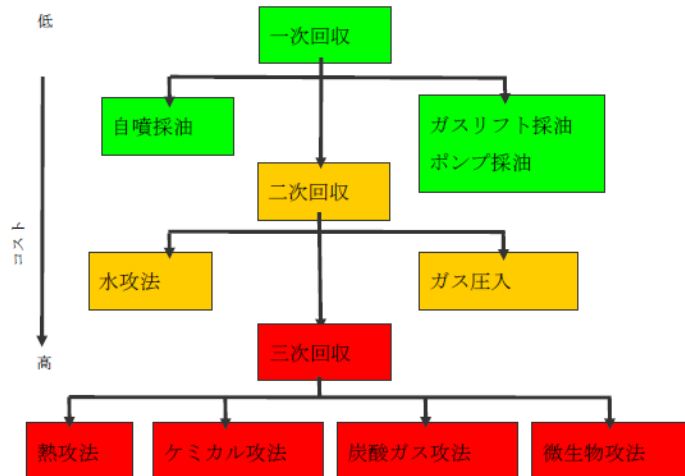
減退期の油生産のイメージ



- ・原油は油層圧力と地上の圧力との差により自噴
- ・生産が進み油層の圧力低下により、水つき、ガスつきの問題が発生。水やガスは油より粘性が低いため、産出しやすい
- ・この問題可決のため、油層の圧力維持や界面張力や粘性を低下させ、増進回収をはかる

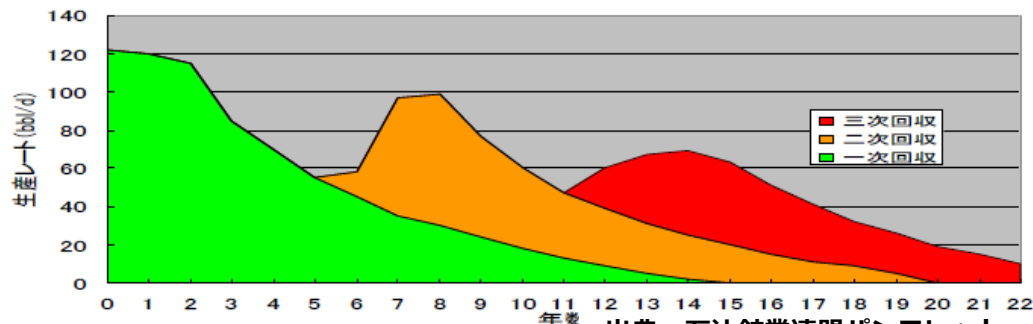
増進回収法(Enhanced or Improved Oil Recovery)による回収率の向上

EORのメカニズム



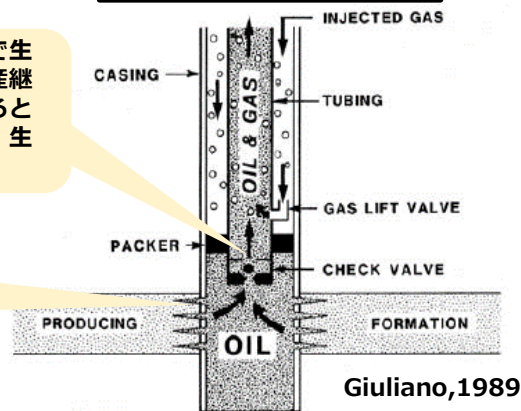
EORによる生産量向上の一例

Moritis G、1998に一部加筆



出典：石油鉱業連盟パンフレット

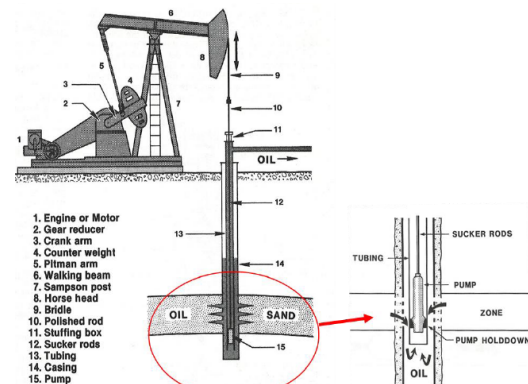
ガスリフトの概念



生産層と地表との圧力差で生産流体は自噴するが、生産継続により圧力差が低下するとガスを圧入し浮力をかけ、生産流体を地上に上げる。

生産の際にはチュービングをセットし仕上げる(穴をあける)。

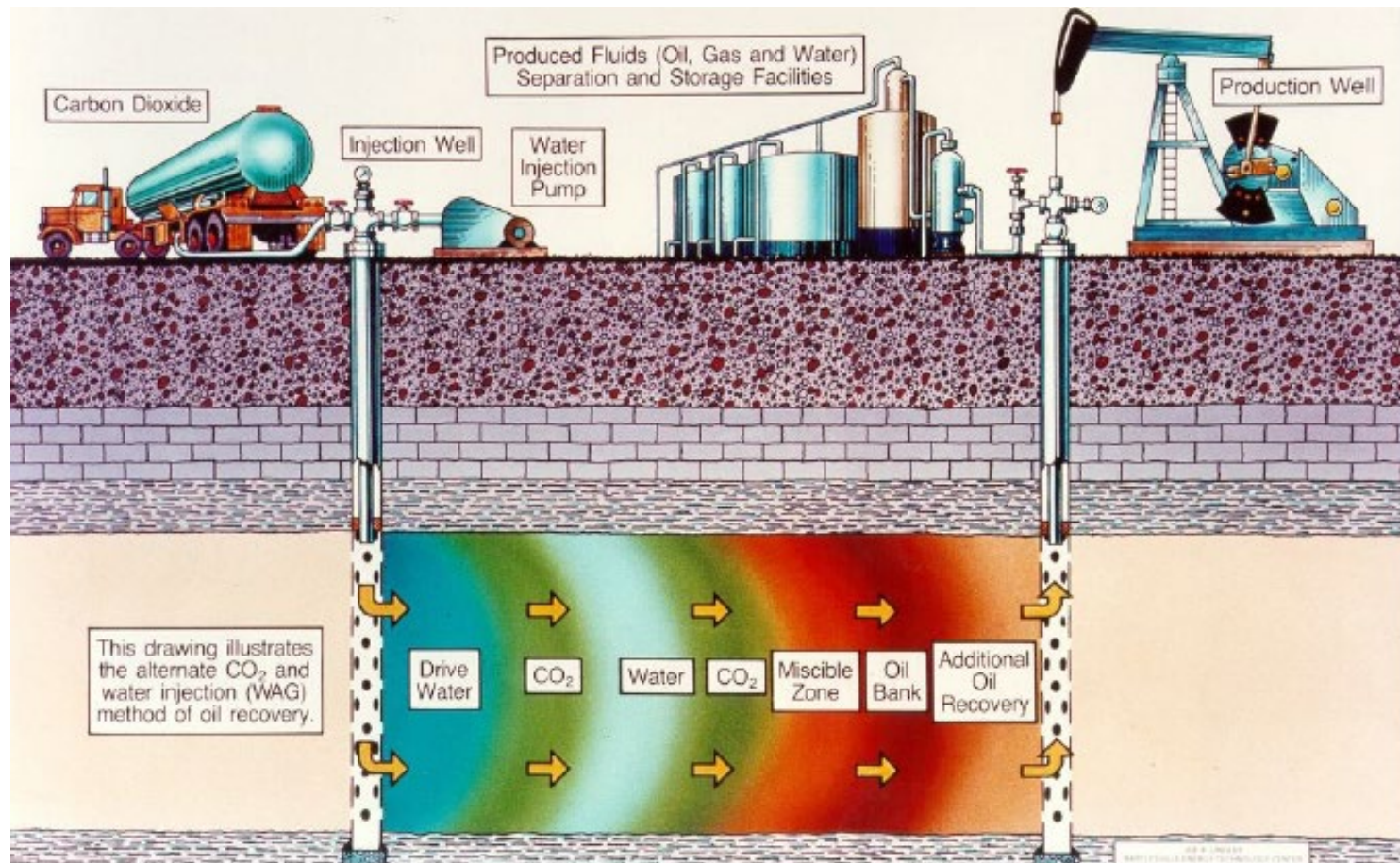
サッカーストッドポンプの模式図



Giuliano, 1989を一部加工

地下の油層はある程度の圧力を持ち**自噴**、その後**ガスリフト**や**ポンピング**等の**一次回収**で生産量維持。圧力低下の油層に水やガスを圧入し、**圧力を維持**して油の回収率を上げるのが**二次回収**、水蒸気やCO₂を圧入しミッシブル(混和)状態を作り油層の**界面張力と粘性低下**で油を流動化させ回収率を上げるのが**三次回収**

CO₂による回収率向上の例(三次回収)



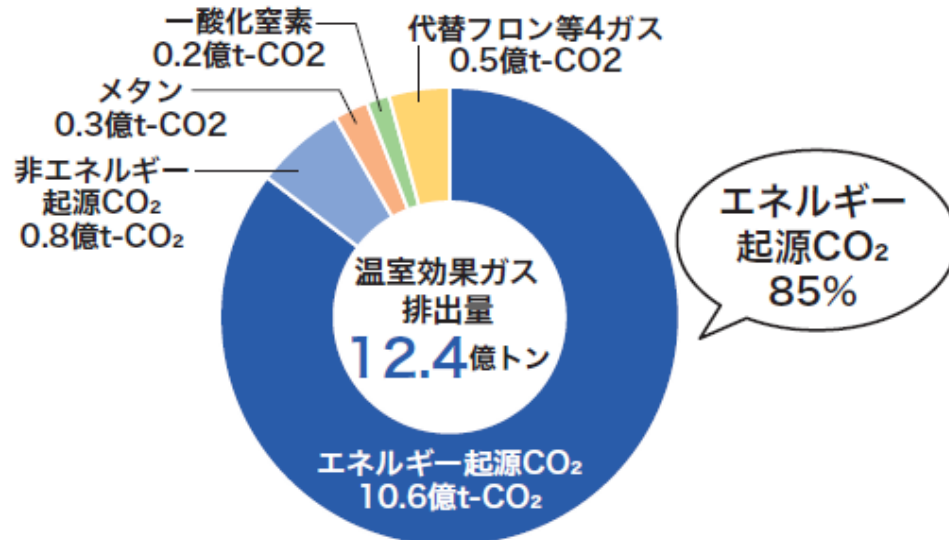
出典：米国エネルギー省(DOE) Office of Fossil Energyウェブサイト

ミシブル(混和)ガス攻法は高温・高圧状態のガスと液体が油層内で均質な単一相を形成し、油の粘性を下げ、押し出す(上図)。米国では安価なCO₂が利用できるためこのタイプの攻法が盛ん←一種のCO₂地下貯蔵(CCS)で、CO₂を資源として有効利用(CCUS)。今後、さらに進展すると推測

CCS/CCUS導入の背景

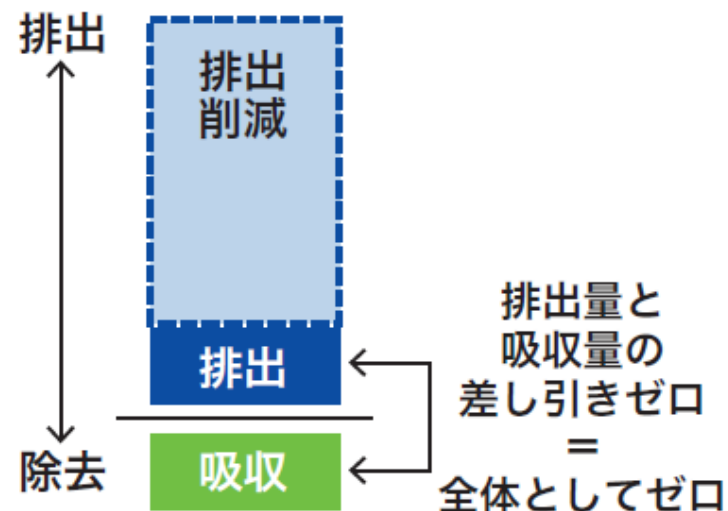
温室効果ガスネットゼロの意味

日本の温室効果ガス排出量(2018年度)



※CO₂以外の温室効果ガスはCO₂換算した数値

温室効果ガスのネットゼロ排出のイメージ



出典：日本のエネルギー2020、エネ庁2020

2050年温室効果ガス「ネットゼロ」は今日多くの国によって支持されているが、その概念の前提は**極端な省エネの推進、大量の再生可能エネルギー導入**、さらに**排出した温室効果ガス**を下記の手法等で**除去**し、全体として2050年までに**差し引きゼロ**にすること。

- ① **CCS(*)/CCUS**で地中に封鎖→CO₂の**分離・回収、輸送、圧入**の**コスト低減化、適地選定**が課題
- ② **植林**で新たな吸収源を作る→植林用の**広大な土地面積**が必要
- ③ CO₂を**化学変化等で他の物質に変換**→多くの技術は研究/開発段階、**量・コスト低減化**が課題

補足(*)：CCSとはCarbon dioxide Capture & Storage、UはUtilize

→・「ネットゼロ」とは「化石エネルギーを使わない」の意味ではない

- ・ **CCS/CCUSは低炭素化を目指した継続的な化石エネルギー使用には有効な手法で、既存・新規上流開発事業でも導入が検討されつつある**

講義内容

1. 石油・天然ガスとは

- (1) 一次エネルギーの分類、(2)石油の成分と分類
- (3) 石油・天然ガス産業の流れ(上流と下流)と歴史
- (4) 石油・天然ガスの利点と欠点

2. 石油・天然ガス鉱床

- (1) 鉱床を生みだす堆積盆地、(2) 鉱床成立の5要件、(3) 埋蔵量(資源量)評価

3. 上流開発の事業内容

- (1) 探鉱・開発・生産作業の流れ、(2) 事前調査・鉱区取得、(3)物理探鉱
- (4) 坑井の掘削、(5) 開発作業、(6) 原油の二次回収と三次回収
- (7) CCS/CCUS導入の背景

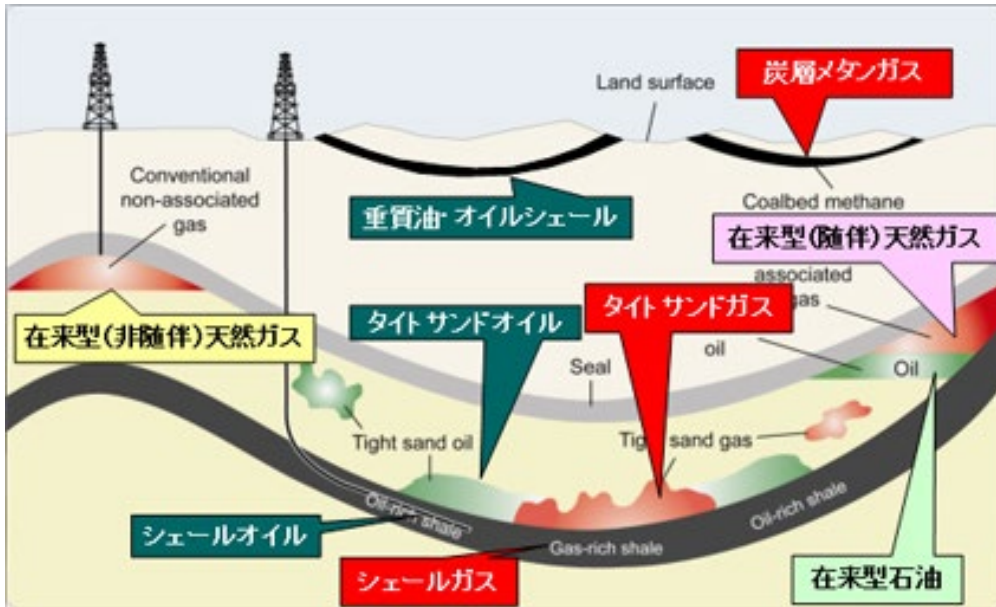
4. 非在来型石油・天然ガス資源の開発

5. まとめ

非在来型石油・ガス資源の産出概念

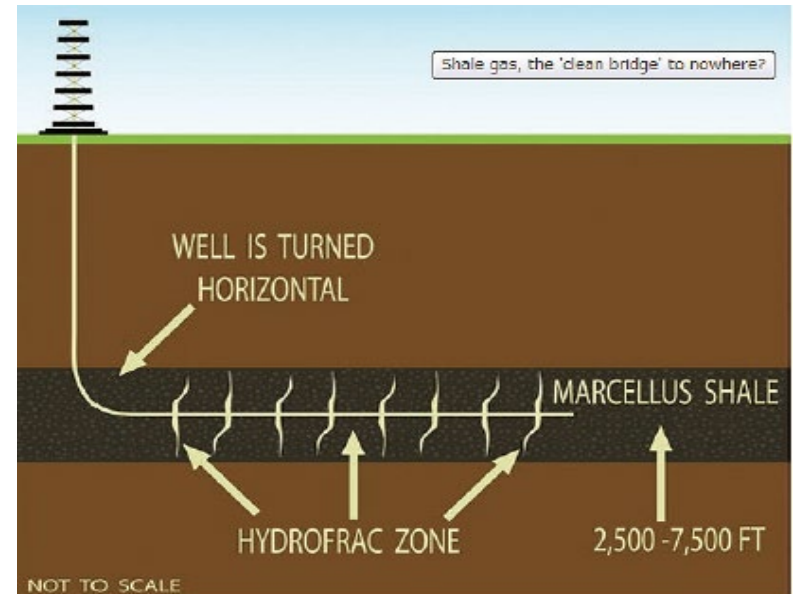
在来型と非在来型の違いは開発初期に自噴するか否か！

鉱床形成場所の概念図



出典：米国地質調査所(USGS)に加筆

シェールガス・シェールオイルに対する
水平坑井と水圧破碎の概念図



出典：Leggett, 2012

超重質油

- ・カナダオイルサンド：露天掘り、SAGD法（上下に平行に配置した二本の水平井（上；スチーム圧入、下；ポンプでくみ上げ）
- ・オリノコ超重質油：水平枝掘り、地上では希釈剤を混ぜてパイプラインを通過、改質装置でアップグレード後、製油所へ

オイルシェール（油母頁岩）：未熟成油母頁岩を乾留し、熟成、抽出後、製油所へ

シェールオイル・シェールガス：根源岩となる頁岩（シェール）に水平井、フラクチャリング（水圧破碎）の組み合わせで浸透率を増加させ開発。一坑当たりの生産性が低く、生産期間も短く減退が激しいので、複数の坑井掘削が必要

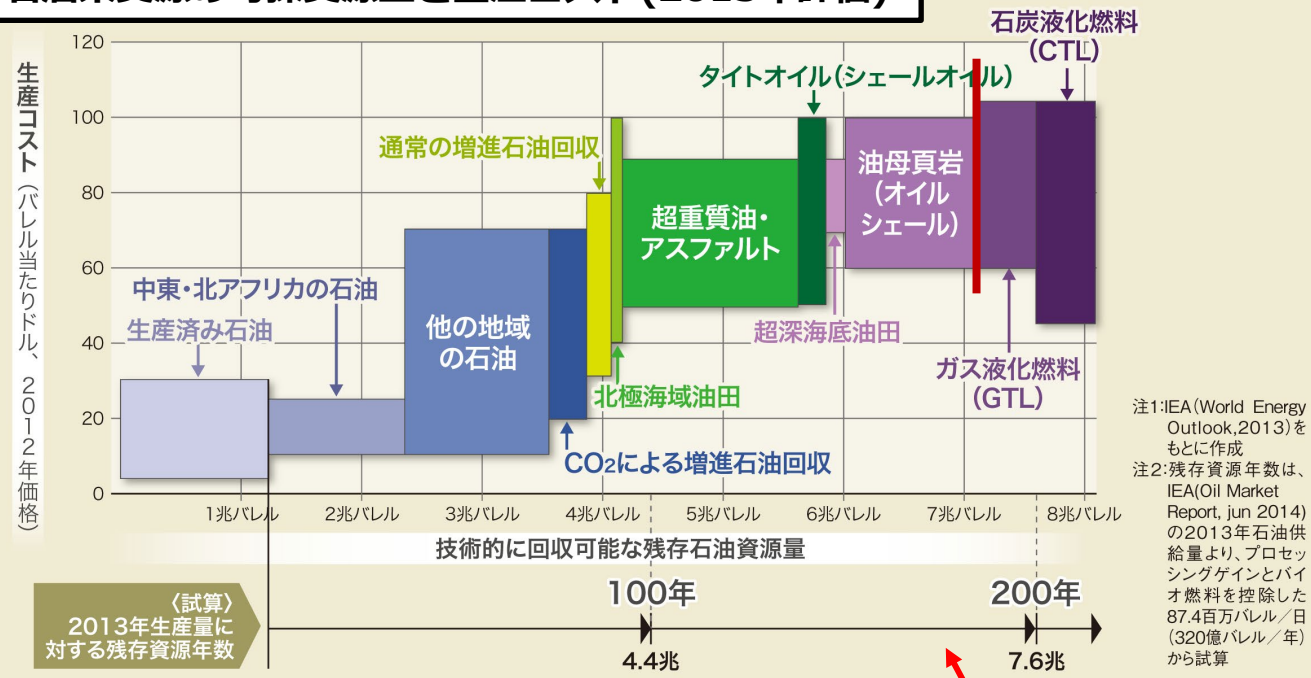
炭層メタン(CBM)：石炭層が吸着しているメタン。開発にはまず、炭層に吸着している水層を抜き圧力を低下させることが必要

タイトサンド：貯留岩で浸透率が低い砂岩。流動性が低いためフラクチャリング（水圧破碎）等の作業が必要

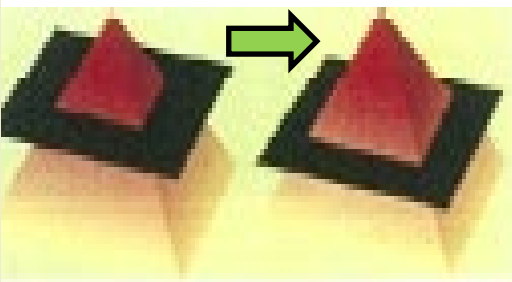
補足:天然ビチューメン/超重質油、シェールオイル/ガス、メタンハイドレートの開発については[参考資料\(7\)](#)、[\(8\)](#)、[\(9\)](#)参照

石油系在来型及び非在来型資源の種類・埋蔵量(資源量)・生産コスト比較

石油系資源の可採資源量と生産コスト(2013年評価)



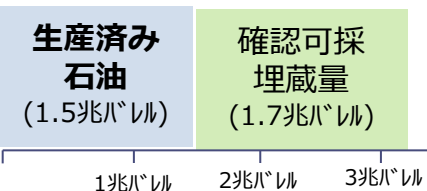
石油系資源のピラミッドモデル



良質の資源(低開発コスト)は少ないが、技術の進歩とともに開発コストが低下し、質の劣る資源も開発可能 (埋蔵量)になる！

(McCabe,1998)

石油の累計生産量と確認可採埋蔵量(2020年)



両図の横スケールは同じ

- 生産済み石油は、2015年末で1兆3287億バレル(石鉱業資源ステイ2017).2016~2020年までの生産量を約1億バレル/日と仮定すると2020年末の累計生産量は約1兆5千億バレル
- 確認可採埋蔵量はBP統計(2021)に基づく(超重質油や超深海油田、北極海油田の一部も含まれる)

生成された**石油資源は膨大**に存在するが、利用可能な**埋蔵量**(確認可採埋蔵量を今日の生産量で割った可採年数は約50年)にするためには**投資の継続が必要**

1. 石油・天然ガスとは

- (1) 一次エネルギーの分類、(2)石油の成分と分類
- (3) 石油・天然ガス産業の流れ(上流と下流)と歴史
- (4) 石油・天然ガスの利点と欠点

2. 石油・天然ガス鉱床

- (1) 鉱床を生みだす堆積盆地、(2) 鉱床成立の5要件、(3) 埋蔵量(資源量)評価

3. 上流開発の事業内容

- (1) 探鉱・開発・生産作業の流れ、(2) 事前調査・鉱区取得、(3)物理探鉱
- (4) 坑井の掘削、(5) 開発作業、(6) 原油の二次回収と三次回収
- (7) CCS/CCUS導入の背景

4. 非在来型石油・天然ガス資源の開発

5. まとめ

まとめ

・石油・天然ガスを探鉱・開発する理由：

①加工しやすく活用しやすい、②エネルギー密度が高い(原子力を除く他の手法では、同等のエネルギーを生み出すためには広大な敷地・設備と大量の鉱物資源が必要)、③貯蔵・運搬がしやすい

・化石エネルギーは電力の他、燃料、原料としても使われ、主に発電用に使われる再生可能エネルギーが、化石エネルギーの代替となる道筋(量、質、コスト、貯蔵技術、制度・法制等)が不透明な現状では、エネルギーの安定供給には化石エネルギーが当面必要。化石エネルギーの開発にあたっては、石炭、石油使用から、CO₂排出係数の少ないガスシフトや低/脱炭素化も考慮

・石油・天然ガスの上流開発(探鉱、開発・生産、輸送)の特徴：

上流事業はリスクビジネス(探鉱段階で終結するプロジェクトが主で、開発段階まで辿りつけるプロジェクトは約1割)でリードタイム(発見から生産までの期間)も長いが、生産開始後のリターンも大きい(エネルギー密度が高いため収益性が高い。但し油価変動により大きく影響)。国際的なビジネスで事業は国際基準

・石油・天然ガスの上流開発において開発容易な陸上・浅海事業の機会は減少し、今後は、奥地、極地、深海など、より開発コストが高い地域(*)や非在来型(特にシェールガス・シェールオイル)などの事業にも移行。海洋の巨大ガス田開発事業は液化施設建設を含めると投資額が巨額なうえ、プロジェクト立ち上げに長期間

補足(*):現在の係争/紛争地域も問題が解決されれば新たな対象地

・日本の石油・天然ガス上流開発会社は石油・天然ガスの探鉱・開発・生産、輸送に止まらず総合エネルギー会社を目指しているのが現状。これまで培ってきた技術と親和性の高い地熱発電やCCS(地下評価技術、掘削技術の適用)、洋上風力発電(海洋開発技術の適用)、生産施設等で分離回収したCO₂とH₂(**)からメタンを作るメタネーション等も検討。

補足(**):他所からの調達が必要

・そのためこれまで以上に多岐にわたる人材の確保・育成も必要。特に、①エネルギーの安定供給という社会的使命に共感できる方、②ダイナミックなエネルギー産業に適応できるグローバルなマインドを持つ方、③目標達成に向けた忍耐と挑戦ができる方

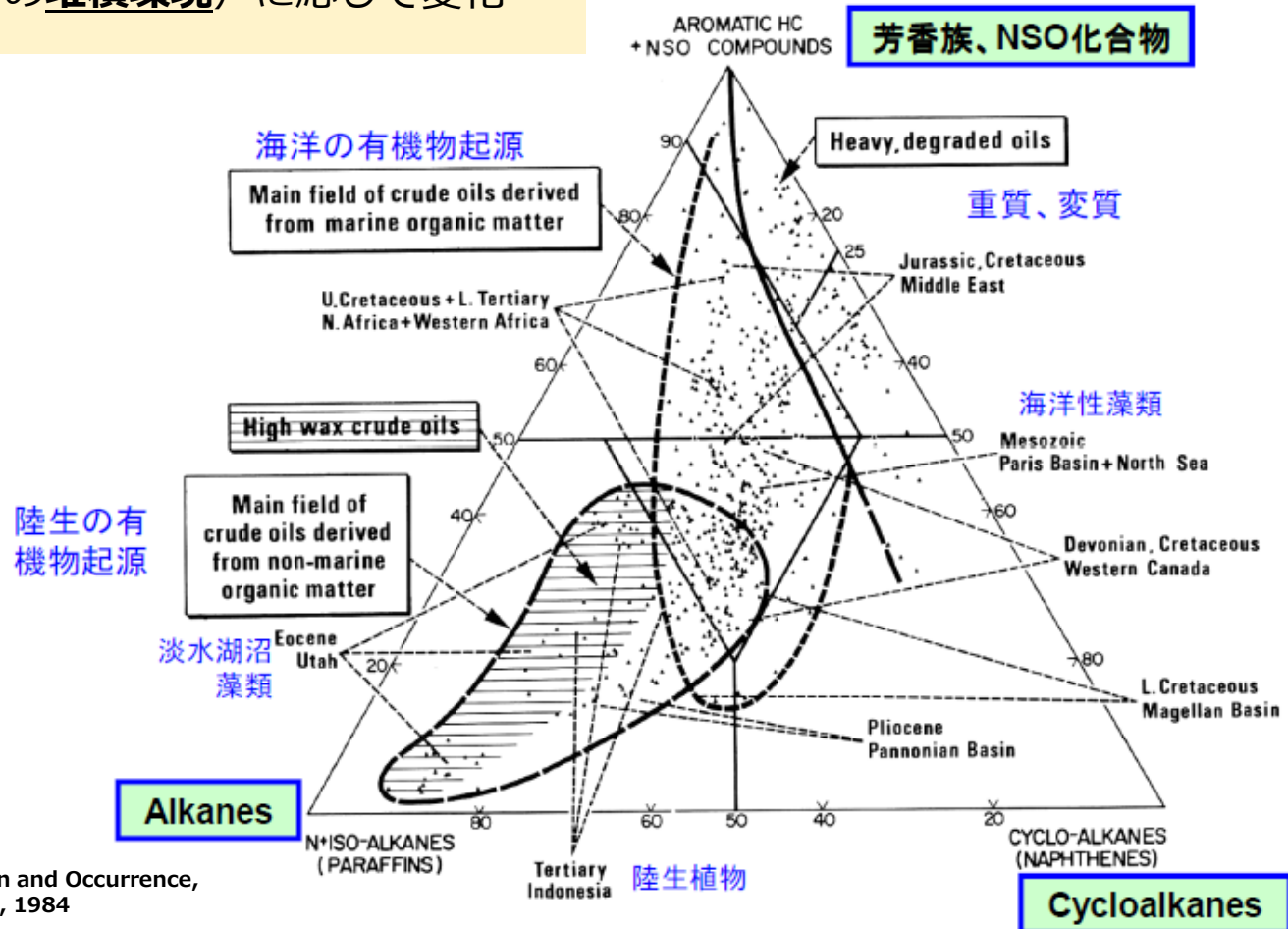
<事務系>対象：全学部学科、特に対外交渉(法学系、外国語系)、経済性評価(経済系)、管理部門

<技術系>対象：地下評価(地球科学系(ジオサイエンス)、資源系(エンジニアリング))、施設/再エネ/DX/HSE(機械系、電気/電子系、土木/建築系、化学系、環境系、海洋系他)

參考資料

参考資料(1):石油の組成の三角ダイアグラム

原油の組成は有機物のタイプ（海成、陸成（or 淡水成）等の堆積環境）に応じて変化

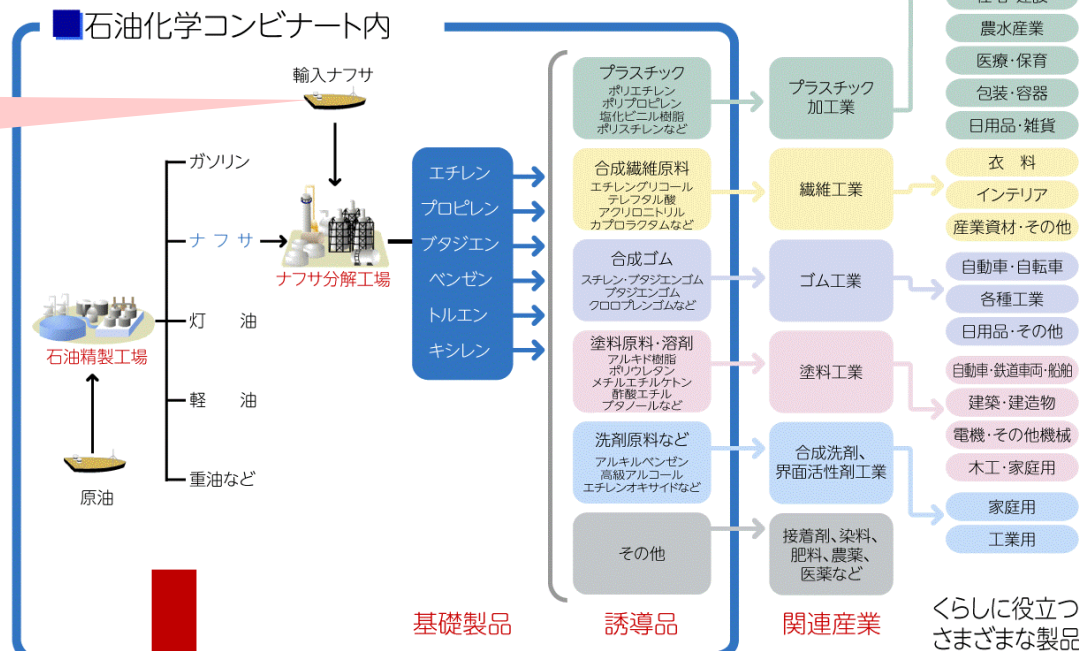


出典 : Petroleum Formation and Occurrence,
Tissot & Welte, 1984

参考資料(2)：石油精製・石油化学の流れ

石油精製・石油化学の流れ概念図

石油化学の原料となるナフサは国内需要量の約半分を海外輸入



沸点の違いを利用し、蒸留装置にて分流

石油精製の流れ



出典：INPEXホームページに一部報告者加筆

出典：石油化学工業協会

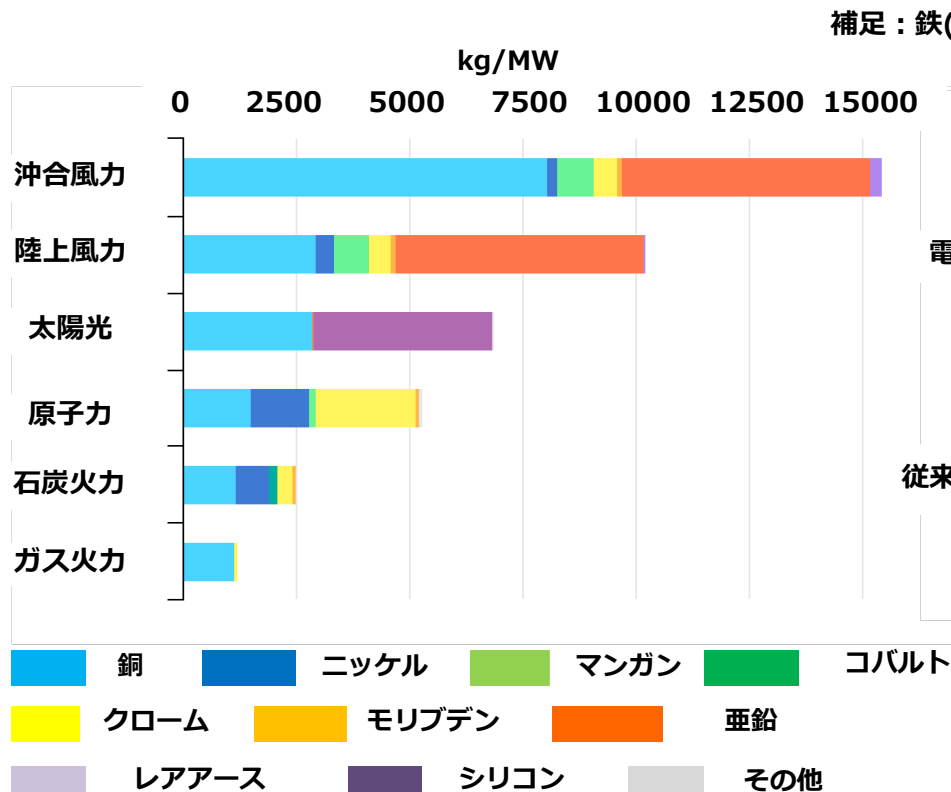
石油製品

蒸留装置での分流から石油製品化するまでの主な過程は、不純物(特にイオウ)を取り除く**水素化精製**、高分子を付加価値の高い低分子にする**接触改質**、**接触分解**

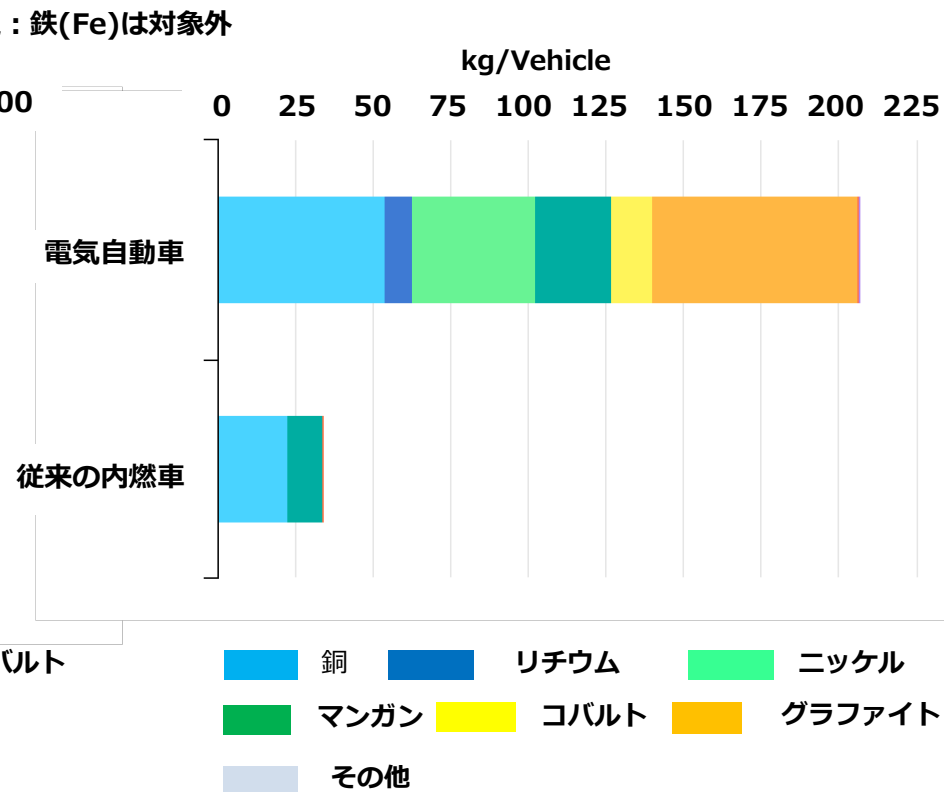
身の回りの製品のほぼ80-90%には石油化学製品が含有。代替製品開発も進んでいるが、量的な代替は困難

参考資料(3)：エネルギートランジションに必要な鉱物資源

発電手法別に必要な鉱物資源



電気自動車に必要な鉱物資源

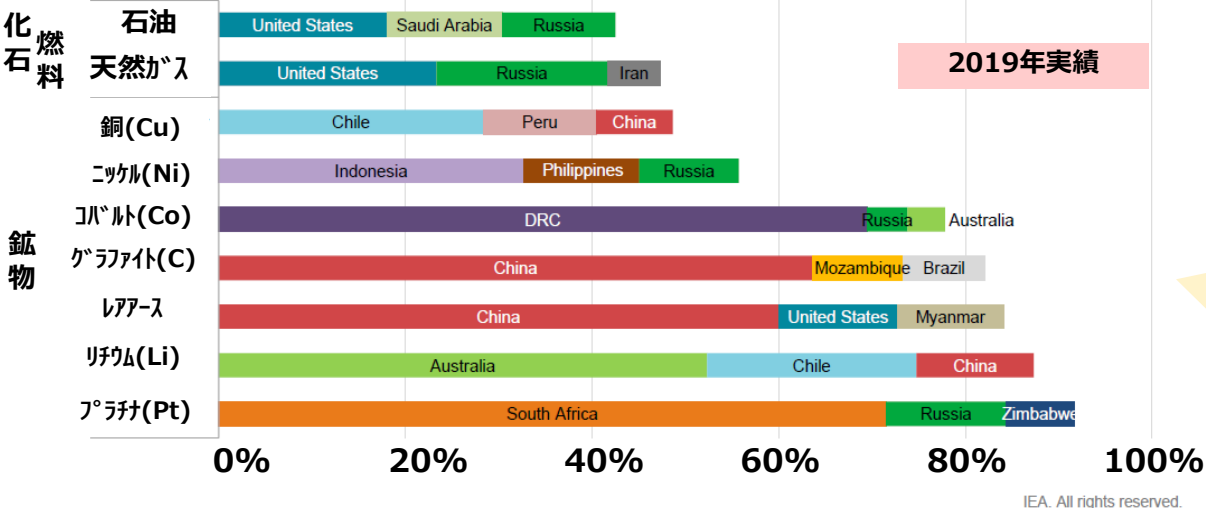


出典: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA2021

- ・ 自然由来の再生可能エネルギー(風力、太陽光)で電力を作るには大量の鉱物資源が必要
- ・ 電気自動車の導入にはリチウム、ニッケル、コバルト、グラファイトの鉱物資源が大量に必要

参考資料(4)：エネルギートランジションに必要な鉱物資源の偏在性

エネルギー開発に必要な資源の生産量上位3ヶ国による偏在度

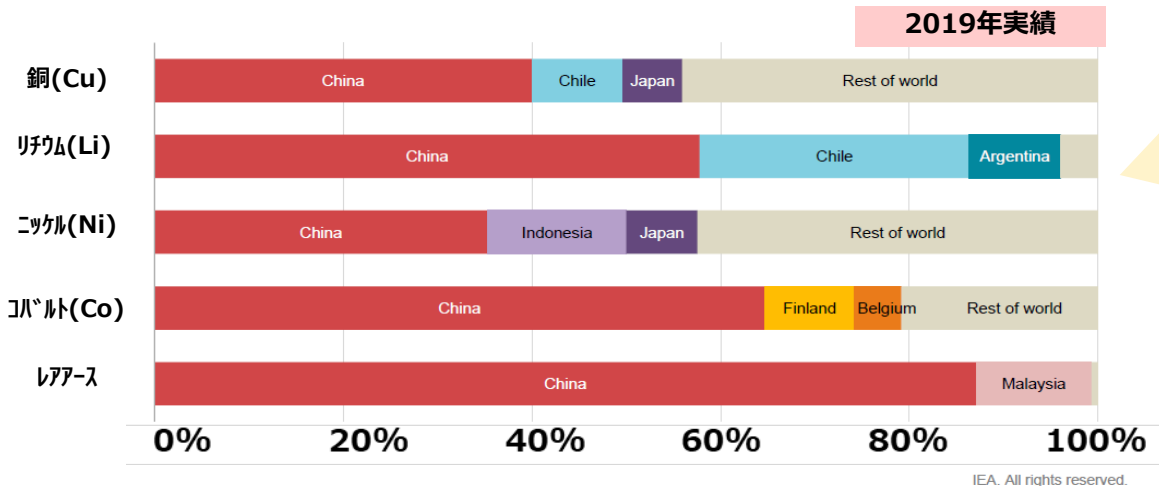


Sources: IEA (2020b); USGS (2021).

・中東地域に世界の石油埋蔵量の約50%、天然ガスの約40%が存在←化石燃料の偏在は共通の認識

・ネットゼロ社会を支える**重要鉱物資源**は石油・天然ガス以上に**偏在度が高い**

エネルギー・トランジションに必要な鉱物精製(プロセス)の上位3ヶ国の占有度



Note: The values for copper are for refining operations.

Sources: World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020) for rare earth elements.

・採掘した鉱石から鉱物を取り出す**精製(製錬/精錬)**の**中国寡占度が高い**。特に**レアース(約90%)**

・背景には**安価で大量の電力**に加え、**安価な人件費**、排水・廃棄物処理で**緩やかな環境規制によるコスト削減**で、**安価な鉱物製品を製造**

出典:The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA2021

参考資料(5):探鉱フェーズから開発準備フェーズ、開発フェーズへの移行

FS (Feasibility Study) を実施し、開発概念設計 (Concept Selection)

FS (Feasibility Study) とは事業可能性（実行可能性、採算性）の検討。調査項目は市場、インフラストラクチャー、環境、プロジェクトスコープ、設備概略仕様、スケジュール、実施体制、生産計画、必要資金と調達、経済性、産油国の法制（特に Local Content）・税制等で、埋蔵量規模の確定後、これらの調査結果に基づき開発概念設計 (Concept Selection)を行う



POD (Plan of Development)

産油国との石油契約の中には、探鉱フェーズから開発フェーズに移行するに際し産油国へのPOD提出が義務付けられており、その承認後、開発フェーズに移行



FEED (Front End Engineering Design)

FEEDでは、FSや開発概念設計で決定された事業計画に沿ってEPC作業前の技術的課題の抽出や概略費用検討を行い基本設計（工事図、配管図等）を決定。プロジェクトによってはFEED実施前に重要な施設、例えばSURF(Subsea Umbilicals, Riser and Flowline；海底坑口装置遠隔操作するための複合ケーブル、海底から生産される流体を洋上生産設備に繋ぐ垂直のパイプ、海底と生産設備に繋ぐ水平のパイプ）や海底パイプライン設備等のPre-Feedを行う場合もある



FID (Final Investment Decision) : 会社が決めるプロジェクトの最終開発投資決定

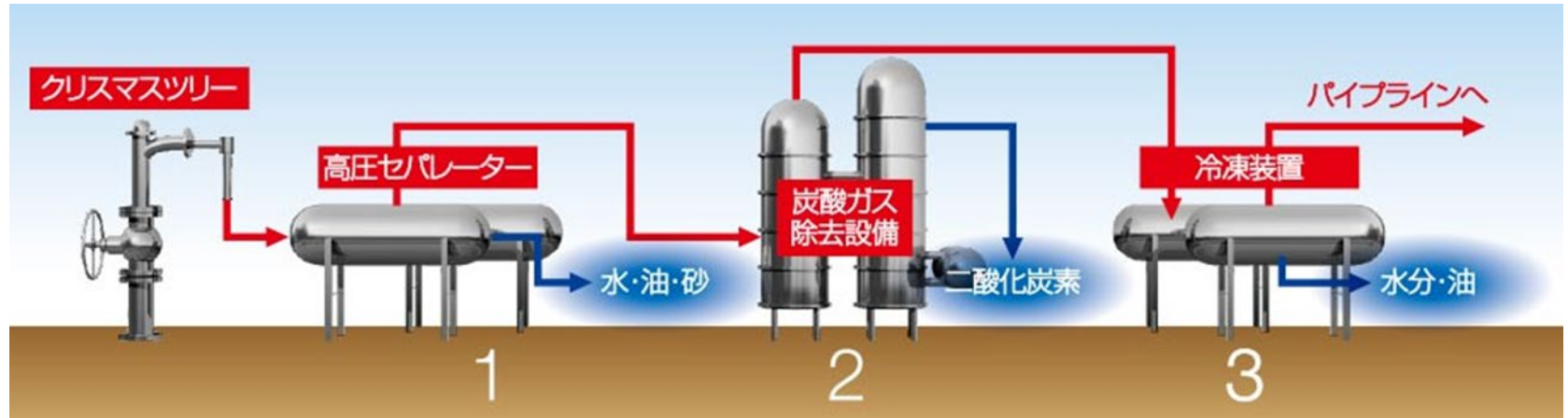
技術的、経済的問題が解決され、許認可（環境影響評価等）の承認も取れていることが前提。ハートナー間の調整も必要



EPC(Engineering, Procurement, Construction)

プロジェクトの詳細設計、調達、施工。EPCに設置(Installation) や試運転(Commissioning)、管理(Management)などを含め、EPCI、EPCC、EPCMと呼ぶ場合もある。FEEDとEPCを一体化させることで、①技術新規性や特許性の高いプロジェクトリスクの軽減、②全体スケジュール短縮による投資効率の向上(早期生産等によるプロジェクトライフサイクルでの収益最大化) に寄与できることもある

参考資料(6)：生産施設の概要



出典:INPEXホームページ

生産施設は、主に以下より構成

1. **セパレーター(separator)**:原油から随伴ガス、地層水を分離、あるいはガスからコンデンサート、地層水を分離する装置
2. **炭酸ガス除去装置**
3. **ガス・デハイドレーター(gas dehydrator)**:パイプラインその他の施設内でのガス・ハイドレートの生成によるトラブルを防ぐため、ガス中に含まれる水分を除去する装置。**脱湿処理法**(別名、**吸収法**)は液体の脱湿剤により水分を吸収除去、固体の脱湿剤により水分を吸着除去する**吸着法**、ガスの断熱膨張による**冷却効果を利用する低温分離法**の三つに大別

その他、セパレーターで分離した液体から、軽質留分をさらに除去して蒸気圧を下げる装置(**スタビライザー、stabilizer**)、**原油脱塩装置**、**エマルジョン処理装置**、**廃水処理装置**、**油・ガス計量装置**、それらに付随した**各種ポンプ**、**コンプレッサー**類などが含まれる。

参考資料(7)：天然ビチューメンの開発 ～カナダオイルサンド～

オイルサンド露天掘り開発



<https://www.climatechangenews.com/2013/07/26/alberta-faces-unstoppable-tar-sands-oil-leak/>

オイルサンド運搬用ダンプカー



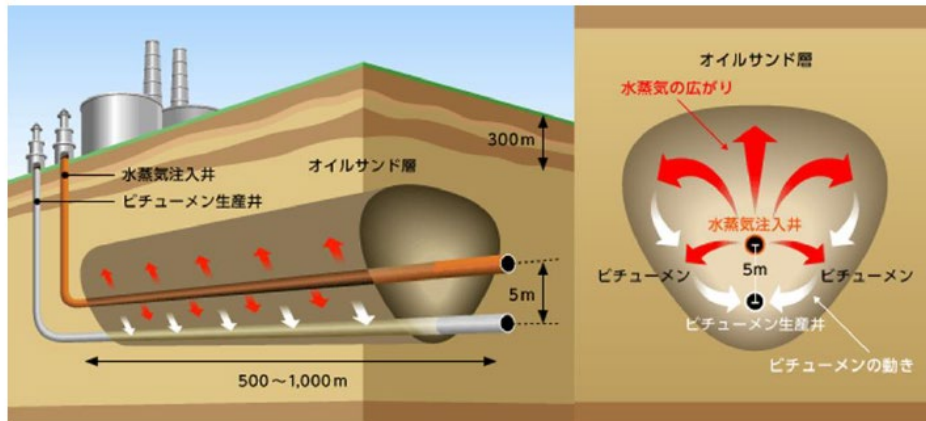
www.dumptrack.org

オイルサンド鉱床位置図



Wikipedia

オイルサンドSAGD法開発概念図

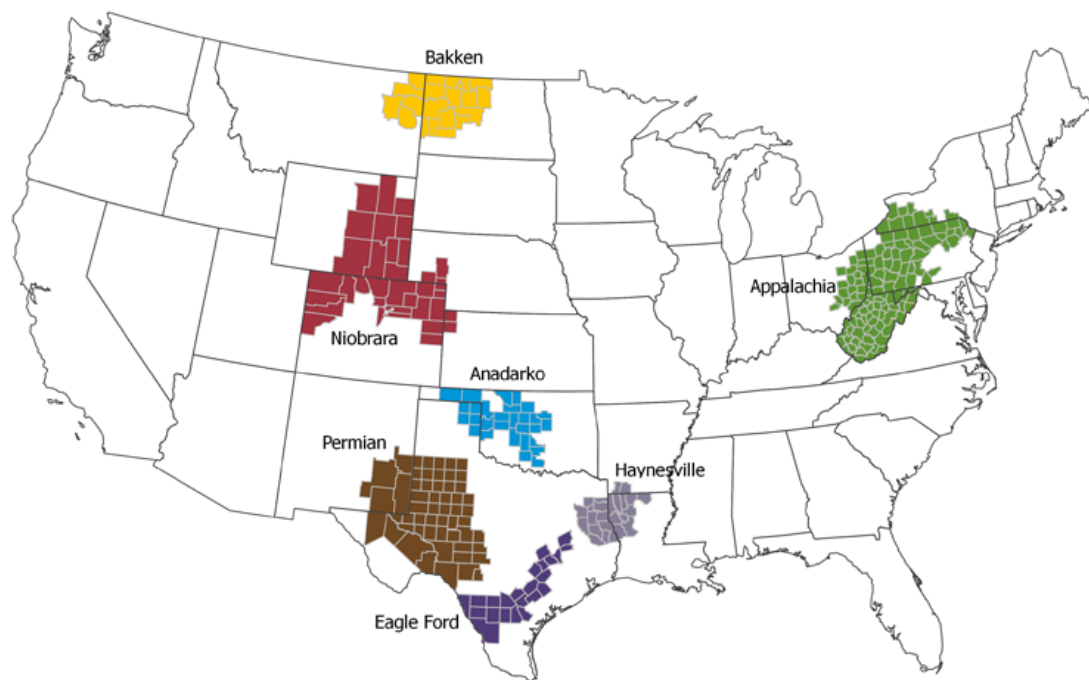


石油資源開発ホームページ

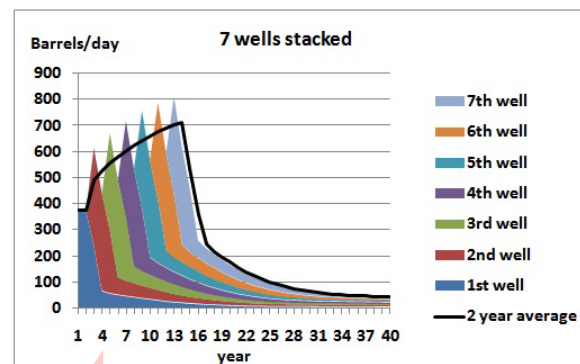
- ・カナダオイルサンド(天然ビチューメン)の開発手法はオイルサンド層が地表から浅い深度の場合は①露天掘り、深い深度の場合は②SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage)法
- ・露天掘りで集めたオイルサンドは加熱しビチューメンを取り出し、さらに改質して合成原油を生成、パイプラインで製油所に輸送。プロジェクト終了後は環境問題から開発前の状態に復帰(現状復帰)
- ・SAGD法は加熱水蒸気を地下圧入し、ビチューメンの粘性を下げ地表に汲み上げ、その後①ビチューメンは希釈剤(コンデンセートや合成原油)を混ぜてパイプラインで製油所へ輸送、②もしくはビチューメンを改質して合成原油にした後パイプラインで製油所へ輸送
- ・ベネスエラオリノコ超重質油は油層深度が深いため地下では流体、地上のパイプラインを通すためには希釈剤が必要

参考資料(8)：シェールオイル、シェールガス、タイトサンドの開発

米国48州の主なシェール開発エリア



Shale Oilの生産プロファイルの例



<http://crudeoilpeak.info/no-number-crunching-in-alan-kohler-opinion-pieces-on-premature-peak-oil-death>

坑井当たりの生産量が少なく、生産期間が短い

eia Source: U.S. Energy Information Administration

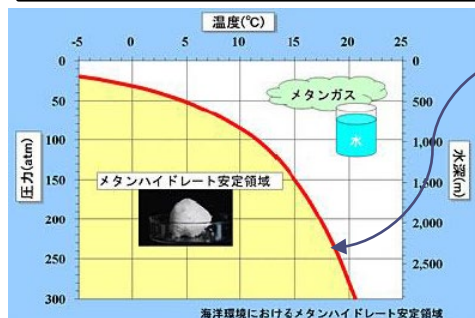
- ・シェールオイル、シェールガス、タイトサンド開発はいずれも浸透率の低い岩石からの開発
- ・これらの開発に欠かせないのは、油・ガス層との接触面を多くする水平掘りと流動の道を作るフラクチャリング(水圧破碎)
- ・一坑の生産量が少なく生産期間も短いため、生産量維持のためには継続した坑井掘削が必要
- ・既存の石油・天然ガス開発と比べ開発コストが高いため既存設備が活用できる米国で発達したが、近年では中国、アルゼンチン他でも開発
- ・操業費軽減化を目指した近隣フィールドの買収が活発化

参考資料(9)：メタンハイドレートの開発

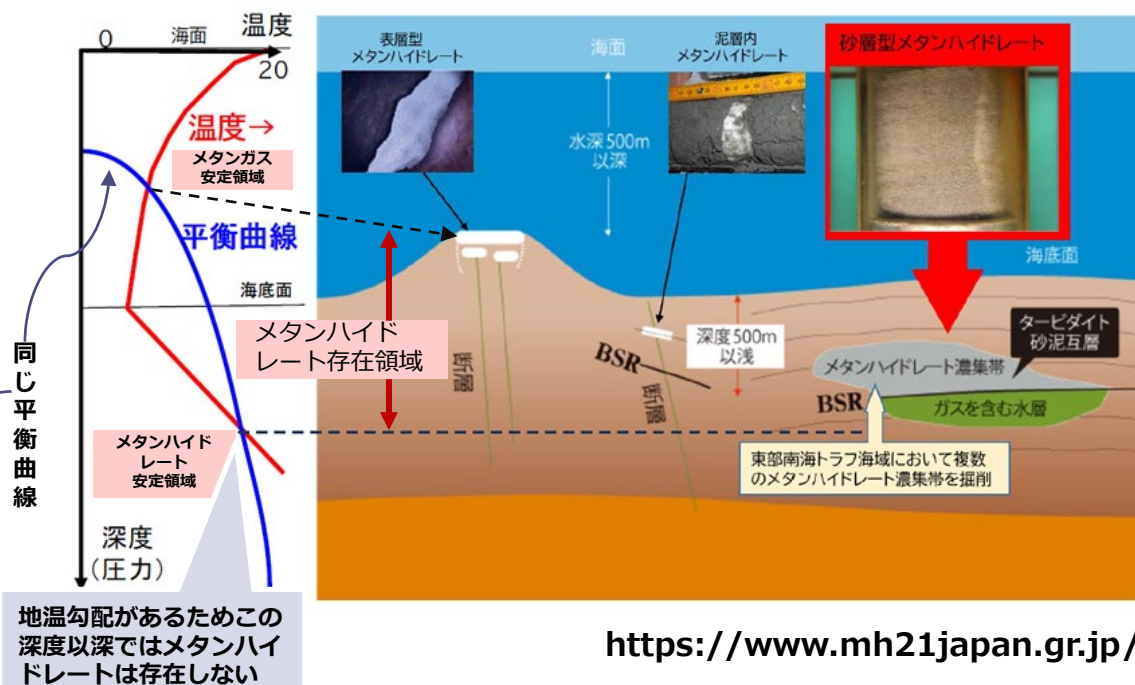
燃えるメタンハイドレート(固体)



メタンハイドレート安定領域



相平衡曲線と海底と地下の温度の変化（左側）と
メタンハイドレートの存在形態（右側）



<https://www.mh21japan.gr.jp/>

- ・ メタンハイドレートは低温・高圧化で安定な固体（シャーベット状）で日本周辺では水深500m～海底面下数百mの範囲に存在
 - ・ 砂層型メタンハイドレートを坑井掘削により流体として回収するには相変化(固体→気体)が必要
 - ・ 現在は加熱法(人工的に層内を加熱)、減圧法(層内の水を汲み上げ)で相変化させ開発する研究等が継続進行。また海底面下では対象層岩石の固結度が低いため、生産の際の出砂障害対策も課題
- 補足：BSR(海底疑似反射面：Bottom Simulating Reflector)