

未利用石炭エネルギーの活用

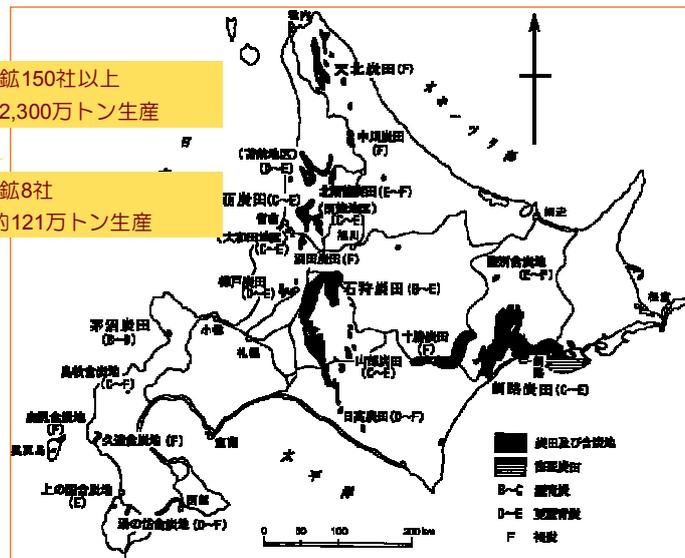
- 北海道の石炭資源とエネルギーのベストミックス
- 炭層メタン(CBM)とは？
- CBM開発モデルとシミュレーション
- 石炭地下ガス化(UCG)とは？
- UCG開発の世界の現状
- 国内でのUCGへの取組
- まとめ

特定非営利活動法人
地下資源イノベーションネットワーク
理事長 出口剛太

北海道の石炭資源

昭和36年(1961)：炭鉱150社以上
昭和41年(1966)：約2,300万トン生産

平成21年(2009)：炭鉱8社
：約121万トン生産



北海道の石炭資源

地域	炭種	炭層厚(千ト)			小計	深層厚(千ト)	
		炭層1級	炭層2級	炭層3級		区分	炭量
北海道計	無煙炭	0	0	0	0	排水層	723,194
	凝結炭	4,572,529	1,278,519	241,890	6,092,938	排水層～300m	3,874,215
	亜凝結炭	3,237,106	2,787,188	837,716	6,862,011	～300m～600m	3,688,774
	褐炭	1,801,841	161,682	0	2,000,504	600m～1200m	6,542,401
	小計	9,738,476	4,225,389	1,078,407	15,042,272	小計	14,340,282
本州計	無煙炭	167,571	87,117	22,770	277,457	排水層	65,855
	凝結炭	241,747	12,088	6,813	260,426	排水層～300m	1,243,889
	亜凝結炭	1,191,418	55,118	17,792	1,264,228	300m～600m	558,505
	褐炭	183,724	123,833	15,850	323,307	～600m～1200m	556,591
	小計	1,724,461	378,136	52,425	2,155,022	小計	2,524,831
九州計	無煙炭	222,898	78,976	77,970	379,844	排水層	126,855
	凝結炭	5,574,772	2,321,247	2,888,177	10,784,196	排水層～300m	3,687,317
	亜凝結炭	488,831	495,028	742,246	1,726,105	300m～600m	5,052,227
	褐炭	15,880	3,487	2,951	22,318	～600m～1200m	2,946,588
	小計	6,302,379	3,598,738	4,701,344	14,602,465	小計	12,040,787
合計	無煙炭	390,269	188,113	100,740	679,122	排水層	918,704
	凝結炭	10,386,048	3,300,031	2,818,421	16,504,499	排水層～300m	8,785,520
	亜凝結炭	4,857,406	3,437,334	1,752,758	10,047,498	～300m～600m	9,705,307
	褐炭	2,131,440	288,762	18,901	2,439,103	～600m～1200m	10,045,793
	小計	17,765,163	7,202,141	4,688,821	29,656,104	小計	23,457,191

NPO法人地下資源イノベーションネットワーク調べ

我が国の年間石炭使用量(約1億8千万トン)の160年分

「未利用石炭資源の有効活用」

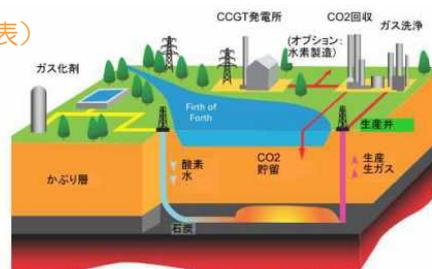
- コミュニティ単位の分散型エネルギーシステムモデル
- エネルギー供給源：**ローカルエネルギー**

炭層に含まれるメタンガス

- 炭層メタン
(CBM：地表からのボーリングにより回収する石炭層中のメタン)
- 炭鉱メタン
(CMM：操業中の炭鉱から排出されるメタンを含む)
- 廃止炭鉱メタン
(AMM：閉山炭鉱跡から湧出するメタン)

石炭地下ガス化生成ガス

石炭とバイオマスの混合ガス化(地表)
自然エネルギー など



在来型天然ガスと非在来型天然ガス

炭層メタン (CBM) は石炭層に含まれるメタンガス (非在来型天然ガス)

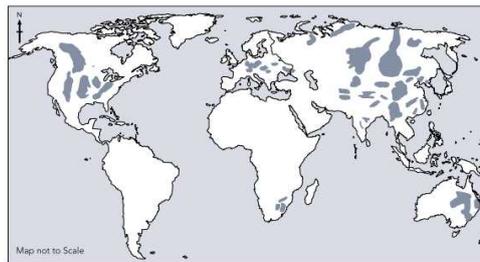
メタンガス濃度が高い (90 %以上)
地表からのボーリングにより生産

在来型天然ガスの可採埋蔵量 (2007) : 180兆m³
(Survey of Energy Resources, 2009, WEC)

非在来型天然ガスの推定資源量 (SPE 103356, 2006)

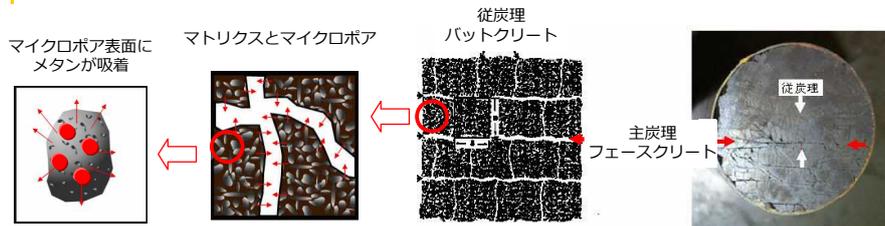
Coal Bed Methane (CBM)	: 250兆m³
Tight Gas	: 207兆m ³
Shale Gas	: 450兆m ³

世界のCBM資源

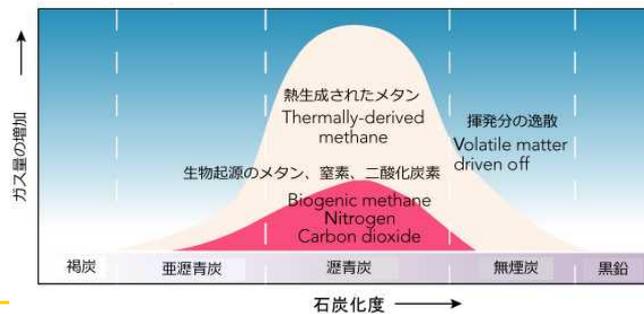


CBM Sector Overview, Fox-Davies CAPITAL

石炭化度と炭層ガス



石炭化の過程で、微生物起源のメタンと熱作用起源のメタンの両方が発生 ⇒ 石炭内部に吸着



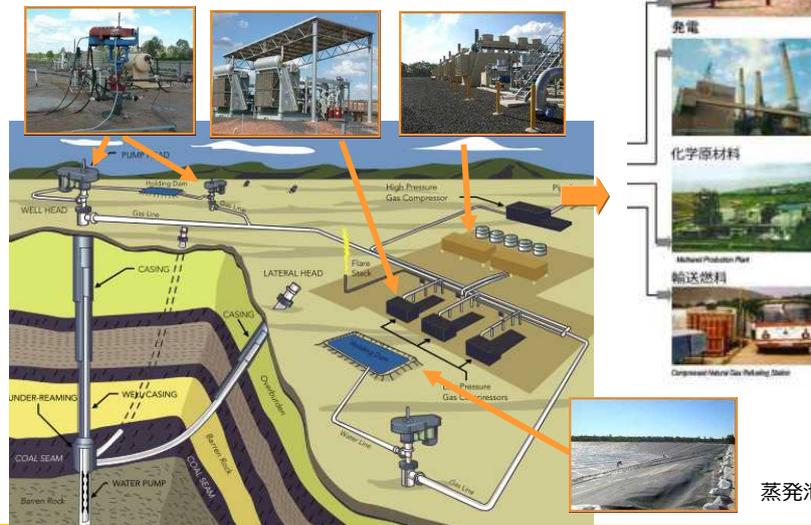
Source: Oilfield Review, Autumn 2003

CBMの開発

坑井ヘッド・ポンプ・セパレーター

コンプレッサー

発電所



CBMはクリーンなエネルギー

- CBMは天然ガスと同じメタンが主成分
- 発熱量：36~40MJ/m³（天然ガス：44~55MJ/m³）

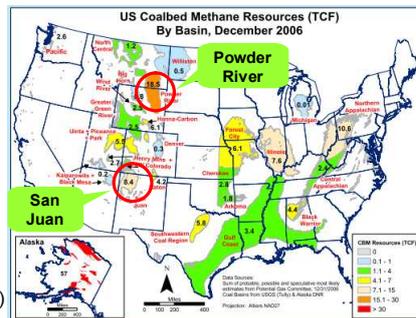
石炭を100とした場合の排出量比較（燃焼時）

	CO ₂ (二酸化炭素)	NO _x (窒素酸化物)	SO _x (硫黄酸化物)
天然ガス	60	40	0
石油	80	70	70
石炭	100	100	100

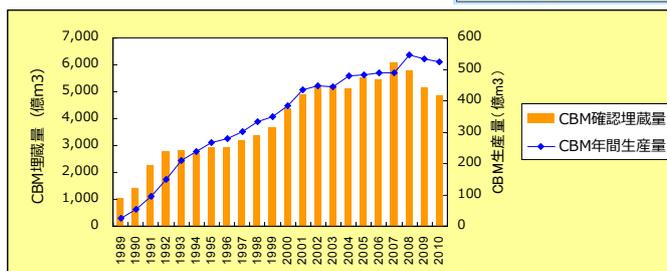
(出典:「エネルギー白書2009」資源エネルギー庁)

CBMの開発 (米国)

- CBM確認埋蔵量 4,900億m³ (2010)
- CBM生産量 520億m³ (2010)
- 全生産量の7割以上は San Juanと Powder Riverから
- 全天然ガス消費量の10%以上はCBM
- 近年はシェールガスの開発ブーム

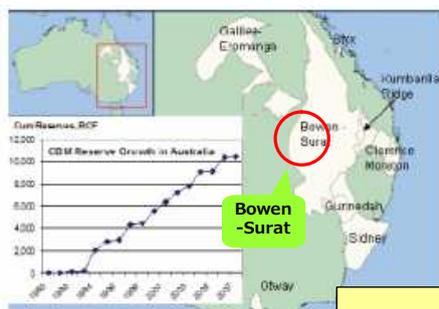


米国のCBM資源 (EIA, U.S. DOE)



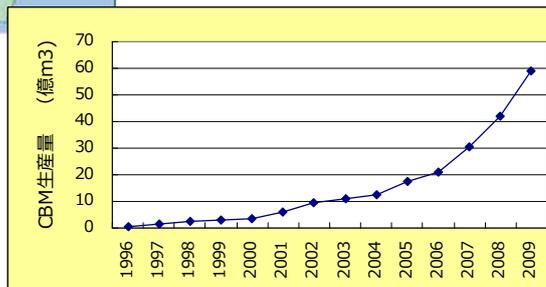
米国のCBM埋蔵量と生産量 (EIA, U.S. DOE)

CBMの開発 (豪州)



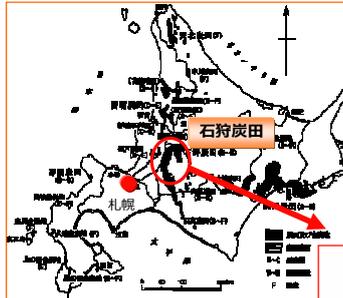
豪州の主要CBM開発炭田 (IHS Inc.)

- CBM埋蔵量 3,000億m³ (2007)
 - CBM生産量 59億m³ (2009*)
 - 全生産量の9割程度は Queensland州
 - 2003年から2009年で生産量は5倍に
 - 全埋蔵量の75%はBowen-Surat炭田
 - 海岸までパイプライン輸送し、LNGとして輸出する計画も
- (*2008年の生産量はQueensland州のみの値)



豪州のCBM生産量
注：2008, 2009年はQldのみ
(Geosciences Australia & Energy Quest)

石炭資源とCBM資源量（北海道・石狩炭田）



我が国の石炭埋蔵量（億トン）

	北海道	全国
無煙炭	0	7
瀝青炭	60.9	163
亜瀝青炭	66.6	100
褐炭	21	24
合計	148	295

NPO法人地下資源イノベーションネットワーク調べ, 2008



CBM開発有望三地域で
約240億m³の資源量

我が国の天然ガス生産量
約37億m³/年（2007）

勇払生産量
約4.5億m³/年（2006）

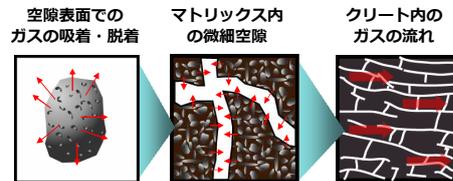
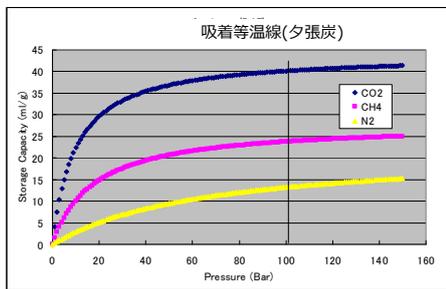


北海道の有望区域の資源量

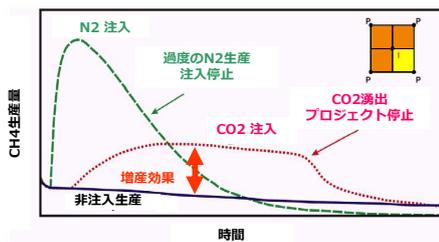
	滝川東部	清水沢～ 南大夕張	夕張西部
面積 km ²	83.2	40.0	32.0
埋蔵炭量 億トン	17.1	5.3	2.8
CBM資源量 億m ³	162.5	50.4	26.6

NEDO: 国内CBM資源調査可能性調査(北海道地区), 1998

石炭の吸着特性とCO₂注入によるCBM増産効果



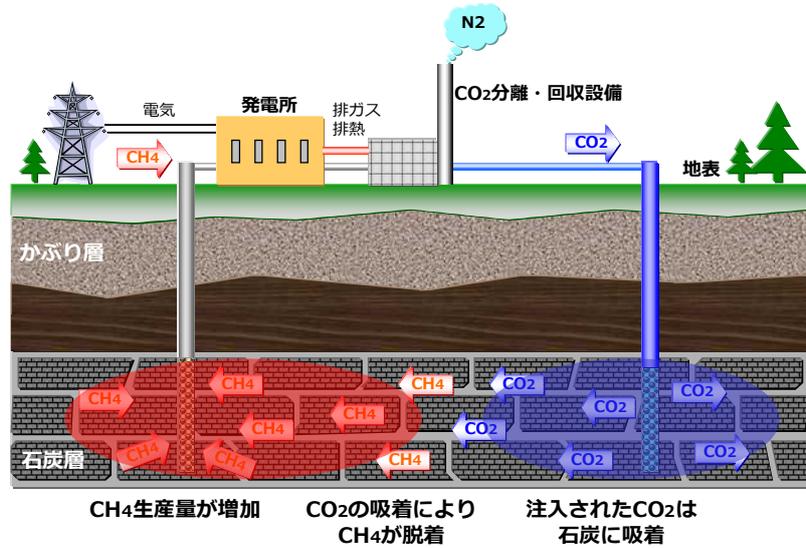
- CO₂はメタンより
- 石炭に吸着しやすい
 - 石炭により多く吸着する



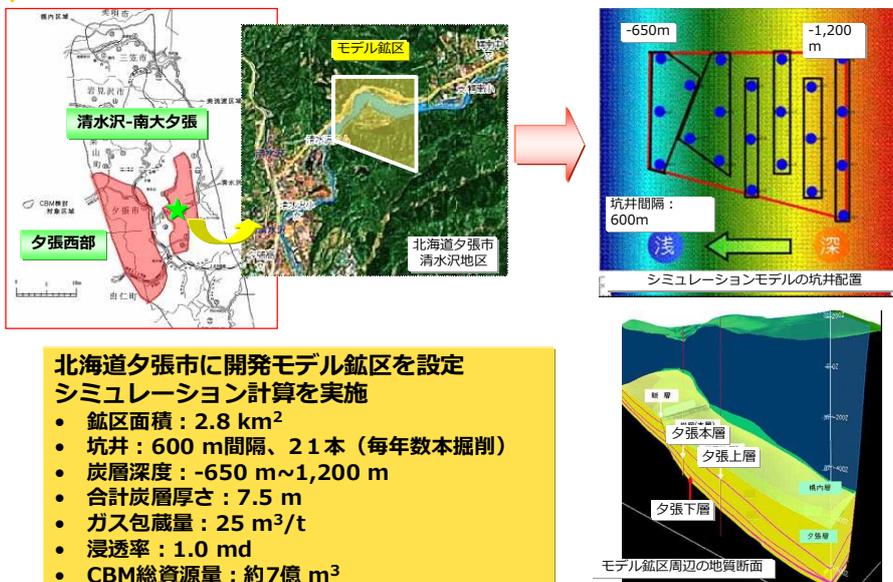
CO₂注入によるCH₄増産効果

(Alberta Research Council, CANADA)

炭層へのCO₂固定とCBM増産 (CO₂-ECBM)



モデル鉱区の設定とシミュレーション計算

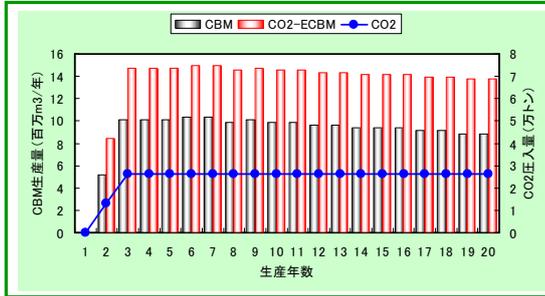


北海道夕張市に開発モデル鉱区を設定
シミュレーション計算を実施

- 鉱区面積: 2.8 km²
- 坑井: 600 m間隔、21本 (毎年数本掘削)
- 炭層深度: -650 m~1,200 m
- 合計炭層厚さ: 7.5 m
- ガス包蔵量: 25 m³/t
- 浸透率: 1.0 md
- CBM総資源量: 約7億 m³

KANSO: 二酸化炭素炭層固定化技術開発成果報告書

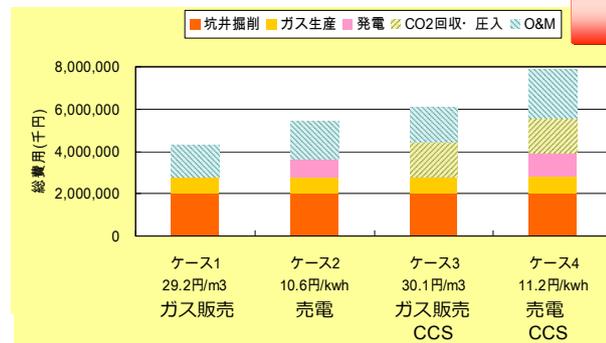
通常のCBM生産量とCO₂-ECBM生産量



- 3年目からフル生産
- CO₂注入量 26,000 t/年
(20t/d/本 × 4本 × 365 × 0.9)
- 総CO₂注入量 330,000 t
- 通常CBMでは1,000万m³/年
総資源量の約27%回収(19年)
- CO₂-ECBMでは1,400万m³/年
総資源量の約38%回収(19年)

平均世帯の年間エネルギー消費量 45.3GJ (エネルギー・経済統計要覧, 2006)
 メタンガスの発熱量 36 MJ/m³ (エネルギー源別発熱量一覧表, METI)
 ⇒ 年間1,400万m³のメタンガスは約11,000世帯分のエネルギー

CBM利用形態別総費用と生産原価

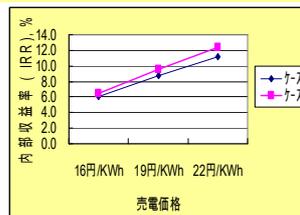
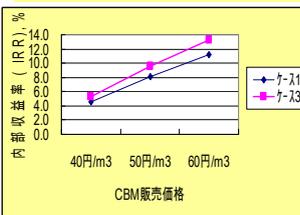


坑井掘削費の占める割合が大
 ⇒ コスト削減の鍵

ガス販売量
 800万m³/年平均(ケース1)
 1,100万m³/年平均(ケース3)

売電量
 2,900万KWh/年平均
 (ケース2)
 3,900万KWh/年平均
 (ケース4)

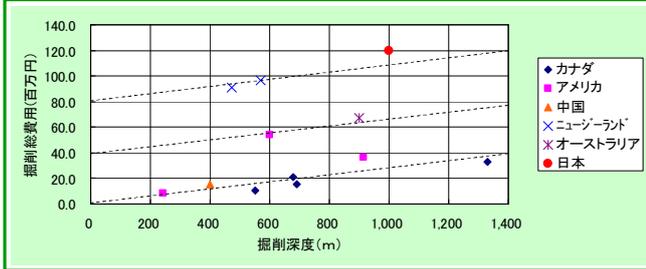
CBM内部消費量
 20 %
 CO₂分離・回収コスト
 3,000 円/t-CO₂



内部収益率の計算

掘削コスト削減の可能性

CBM坑井（垂直）掘削費用の比較

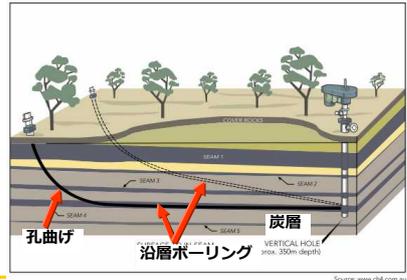


Utrecht Univ., Potential for CO2 sequestration and enhanced coalbed methane production in the Netherlands, March 2001, Netherlands より作成

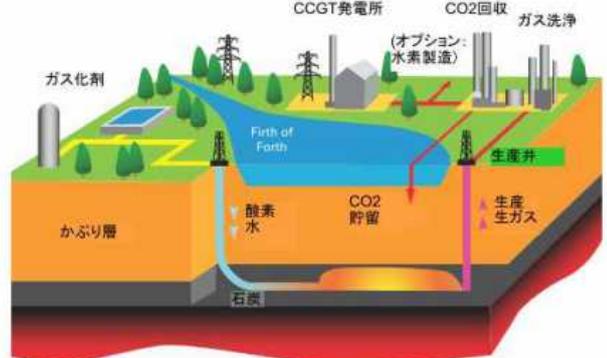
CBM生産量

∝ ガス包蔵量・浸透率・圧力差・**接触面積**
 炭層内の坑井長さを増大
 ⇒ 1本当たりの生産量の増大
 ⇒ 掘削坑井数の削減

方向制御掘削技術の適用



石炭の地下ガス化



- 石炭を採掘することなくエネルギーを回収
- 未利用石炭を活用-埋蔵炭量の増加
- 石炭灰処理の問題解決
- 汚染物質排出(SOx, NOx, 水銀等)の減少
- CO2貯留の可能性
- コスト削減

- 反応プロセスの制御
- 地下水汚染
- 地表沈下

UCGガス化炉内の反応



酸化

- プロセス熱源の生成
- 高温：900～1500℃
- 石炭乾留産物（チャー）が反応

主要反応

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$$

$$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$$

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

還元

- プロセス内熱量の消費
- 燃料成分の生成
- 温度：通常600～1000℃
- 長さ：酸化区域の1.5～2倍
- 主要反応

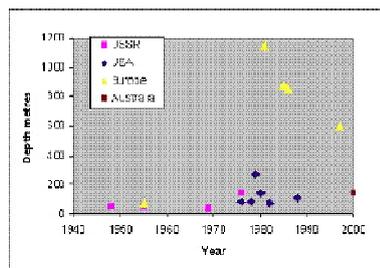
水性ガス反応 $(C + H_2O \rightarrow CO + H_2)$
 発生炉ガス反応 $(C + CO_2 \rightarrow 2CO)$
 水素化反応 $(C + 2H_2 \rightarrow CH_4)$
 シフト反応 $(CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2)$
 ガス変性反応 $(CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O)$ 等

熱分解

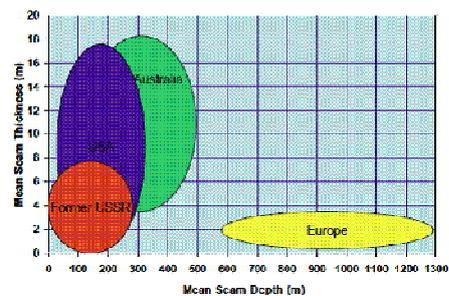
- 石炭の分解（熱量の消費）
- 各種の生成物
- 温度：通常200～600℃
- 乾燥（100℃以下）
- タール等の液状HC析出
- チャーの生成

UCGの歴史

- ◆1886年にドイツのWilliam Siemensが、1888年にはソ連のメンデレーフがUCGを提唱。その後、レーニンがソ連でのUCG活用に言及。
- ◆1931年、ソ連に「UCG特別委員会」が組織され、各地で試験開始。
- ◆以後50年間、ロシアがUCG開発の中心（多くの商業生産に成功）。
- ◆アメリカのUCGへの取組は1960年代初め～1980年代中頃。
- ◆中国では1980年代～現在。
- ◆豪州、ニュージーランド、南ア、ヨーロッパでは1990年代から本格化。



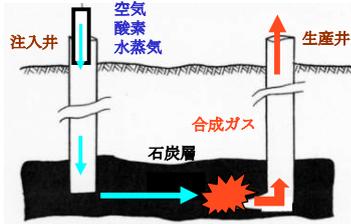
炭層深度の関数としてのUCG試験



炭層の深度と厚さに関連したUCG稼動経験

Source: Lawrence Livermore National Laboratory, USA

リンキング技術



◆リンキング：ガス通路の形成のため注入井と生産井を石炭層内で連結させる重要な技術

- > 圧縮空気法
- > 電気法
- > 化学法
- > 水圧破砕法 など

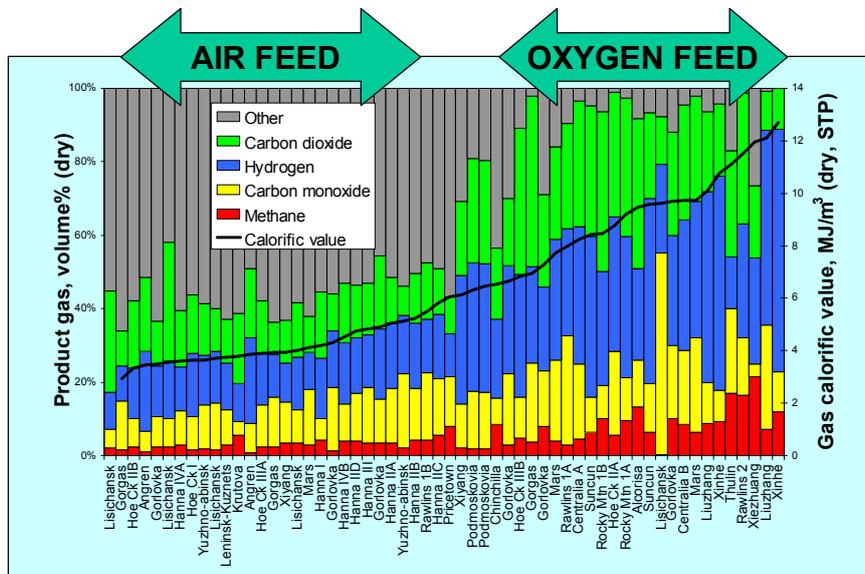
着火技術

- ◆電気着火法
- ◆灼熱コークス
- ◆ガスバーナ法
- ◆酸化剤添加による化学法(シランガス+プロパンガス)

(炭層着火部に水が存在する場合には、孔底部の圧力を上げ、水を炭層内に押し込む)

◆指向性ボーリングによる2坑井連結技術により従来のリンキング技術は不要に

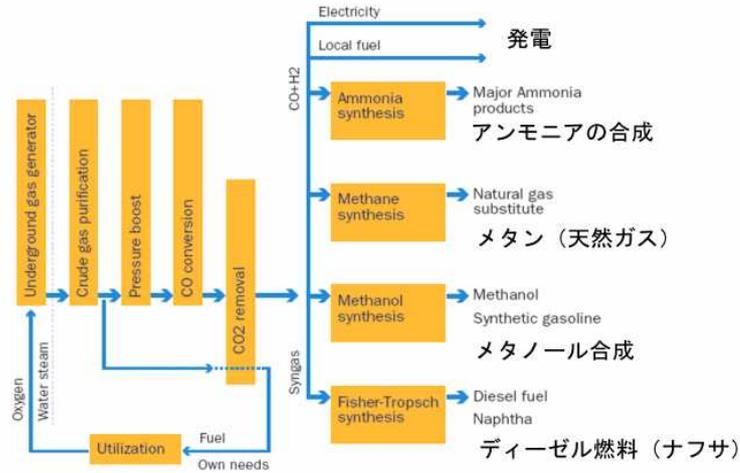
UCG生成ガスの性状（サイト別）



Source: Carbon Energy Co.

UCG生成ガスの利用

UCG process and product options



Source: Promgaz

UCG ポテンシャル

UCG適用石炭量（追加）とUCGガス量の推定

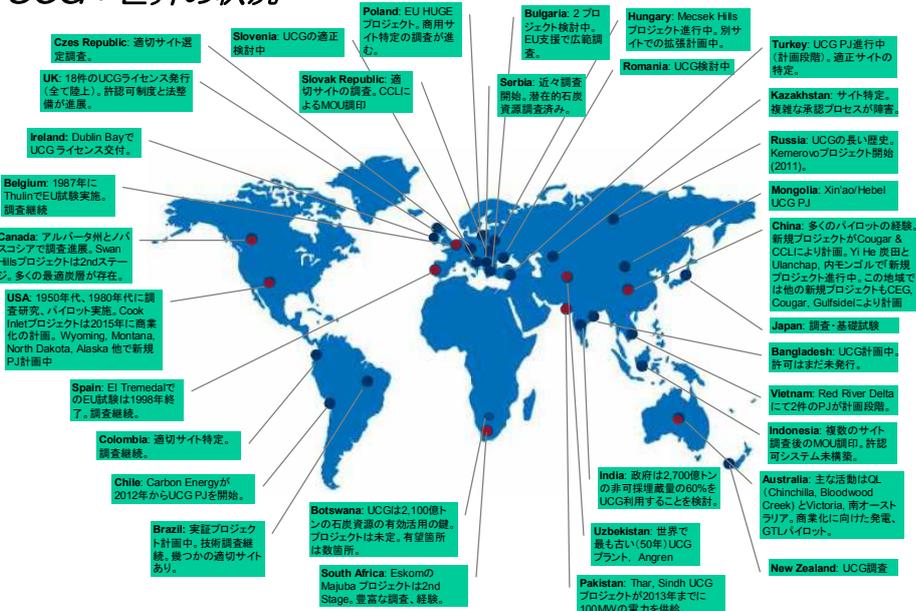
Table 1: Estimated Available Coal Reserves (billion tonnes) & Corresponding Gas Reserve from UCG

	Estimated Available Coal Reserve for UCG (Bt)	Potential Gas Reserves from UCG (as Natural Gas) TCM*	Current Natural Gas Reserve 2006 TCM
USA	138.1	41.4	5.5
Europe (excl. Russia)	130.1	21.8	6.0
Russian Federation	87.9	26.3	47.8
China	64.1	19.2	2.4
India	51.8	15.5	1.1
South Africa	48.7	8.2	0.0
Australia	44.0	13.2	2.5
Total	564.7	145.6	65.2

*TCM: Trillion Cubic Metres

Source: World Coal Institute

UCG : 世界の状況



(Julie Lauder, Annual Review, 7th International UCG Conference & Workshop, May 2012, Londonより作成)

米国におけるUCG (1)

Hanna (LVW法) 1971-1980年に5回の試験(空気吹き)

対象炭層: 深度80-120m, 6-8m厚
温度計測やガス化炉形成状況把握

Hoe Creek (LVW法) 1972-1979年に3回の試験

対象炭層: 下層(深度40m, 7.5m厚)及び上層(深度30m, 3m厚)
上層もガス化 → 地盤沈下、地下水流入により汚染(修復データ取得)



汚染地下水修復作業

タール等の汚染物質が存在しているガス化炉内部に、地下水が流入しないよう加圧空気を送り込み、汚染物質については、微生物処理の方法を採用している。微生物は好気性微生物のため、圧入空気の送入は微生物処理にも適しており、有害物質の減少が確認されている。

Source: LLNL

米国におけるUCG (2)

Rawlins (Gulf Oil/DOE)

- 1979年(空気吹き、30日間)、1981年(酸素/蒸気、65日間)の2回試験
- 炭層傾斜63°、商業規模のガス化炉で実施
- CH₄濃度の高い中カロリーガス
- 酸素使用、プロセス制御良好、全環境規制に準拠
→ 最も成功した例



Rocky Mountain I (Gulf, AMOCO, EPRI等)

- 商業化UCGに最も近い代表的なUCG試験
- 1987~88年、ガス化法(LVW-CRIP)の比較、商業規模用データ収集等
- プロセス評価、環境評価、生成ガスの精製等の検討 → 当初目標を達成

	ELW法*	CRIP法
ガス化期間	58日	93日
石炭消費量(t)	4,443	11,227
石炭ガス化レート(t/日)	70-100	70-200
平均生成ガス熱量 MJ/m ³	8.8	9.5



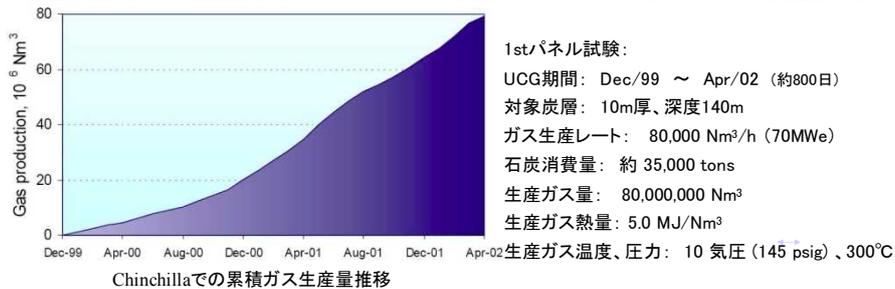
*ELW: Extended Linked Well

Carbon County

- 1995年、商業化(メタン-化学製品)目指す→失敗

Source: LLNL

Chinchilla, Australia (Linc Energy)



Source: Linc Energy

Chinchilla, Australia (Linc Energy)



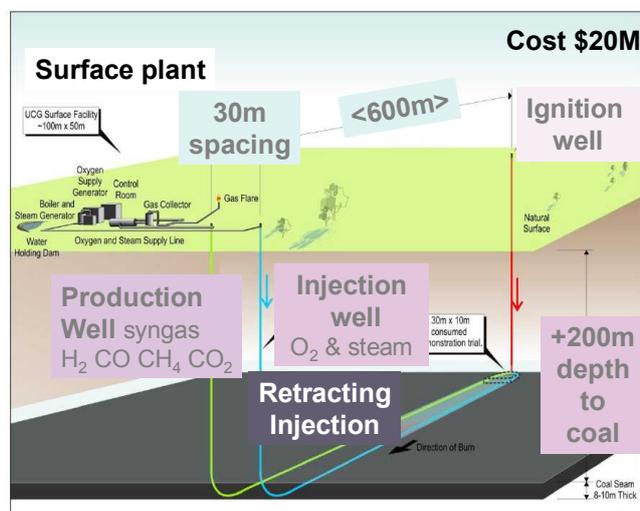
ChinchillaのUCGプラント



ChinchillaのGTL設備

Source: Linc Energy

Bloodwood Creek, Australia (Carbon Energy)



The 100 day Trial

- 酸素吹き込み能力: 70t/d
- 蒸気生産能力: 70t/d
- ガス化レート: 90→150t/d
- 石炭消費量: 12,600 t = 30m x 30m x 10m x 1.4
- 目標ガス生産レート: 1PJ/Year

Source: Carbon Energy Co.

Bloodwood Creek, Australia (Carbon Energy)

- 2011年8月：Bloodwood Creekでの最初の発電
- 2011年2月：UCGパネル2からの最初のガス生産
- 2010年8月：UCGパネル2及びパネル3の建設開始
- 2009年7月：5MW発電所建設開始
- 2011年8月：5MW発電・送電に成功
- 25MW発電所（第2フェーズ）パネル3開発
- 300MW発電所（第3フェーズ）鉱区に隣接するエネルギーパーク内に建設予定



UCG生成ガス発電所(5MW)

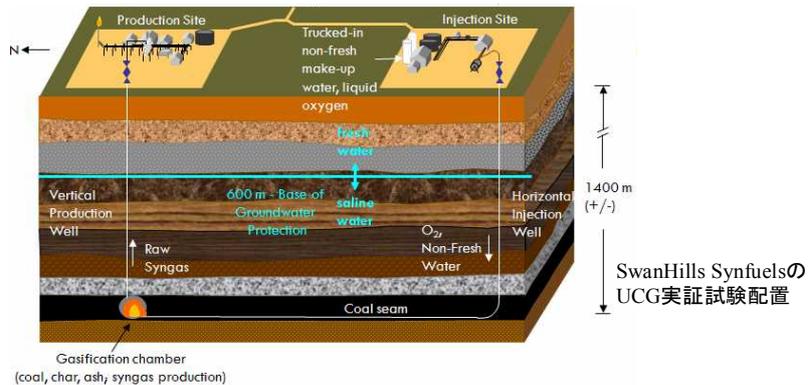


UCG現場坑井配置図

Source: Carbon Energy Co.

SwanHills, Canada (SwanHills Synfuels)

- ISCG (In-Situ Coal Gasification)
- 2009年に実証試験完了（炭層深度1,400m）
- 2015年から総額15億カナダドルのISCG/Powerプロジェクトの開始
- 北米初のUCGガスによる300MW発電とCO₂回収・貯留を組み合わせたプロジェクト



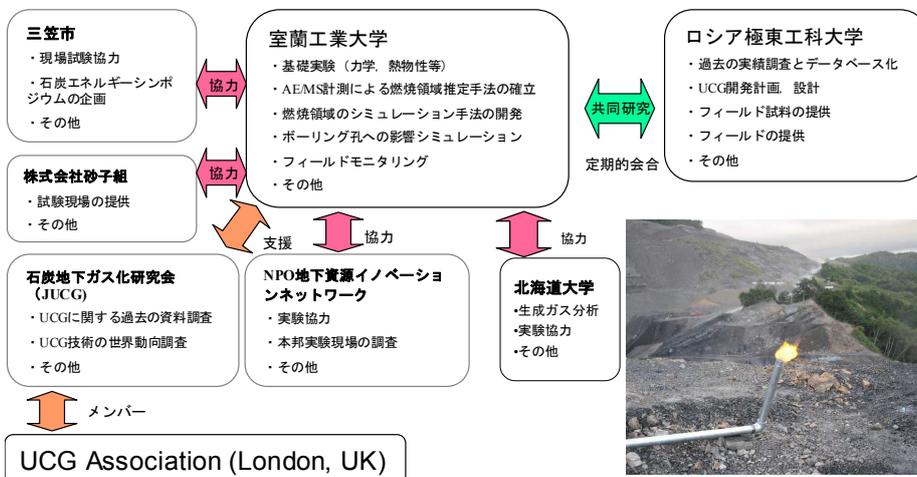
Source: SwanHills Synfuels

SwanHills, Canada (SwanHills Synfuels)



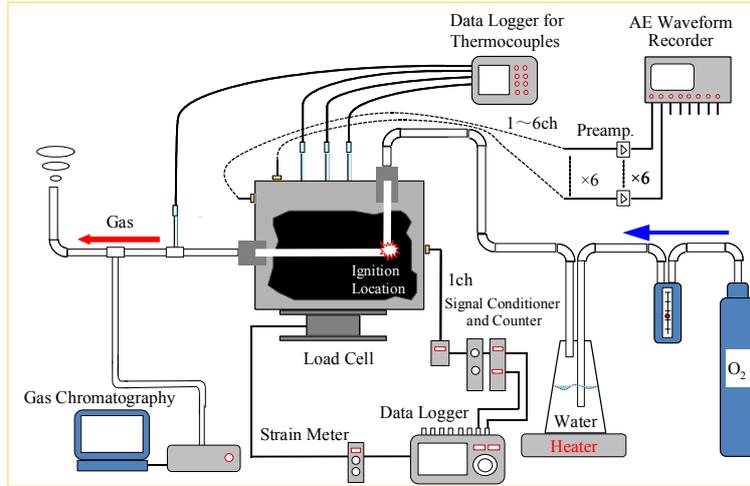
国内でのUCGへの取組

最近のUCG研究の協力体制

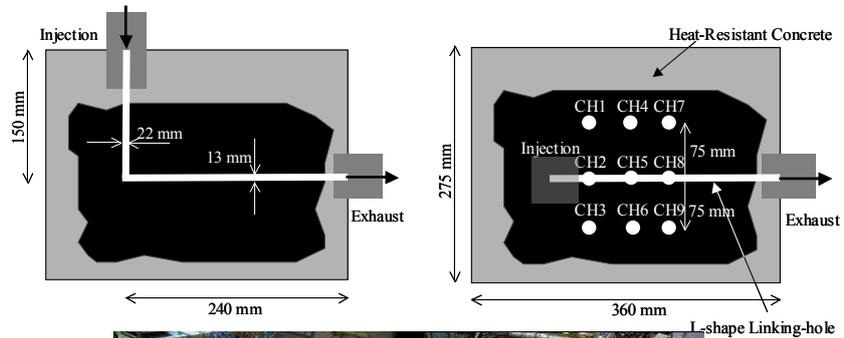


UCG現場試験(砂子放鉱, 三笠市)
2011年8月22日

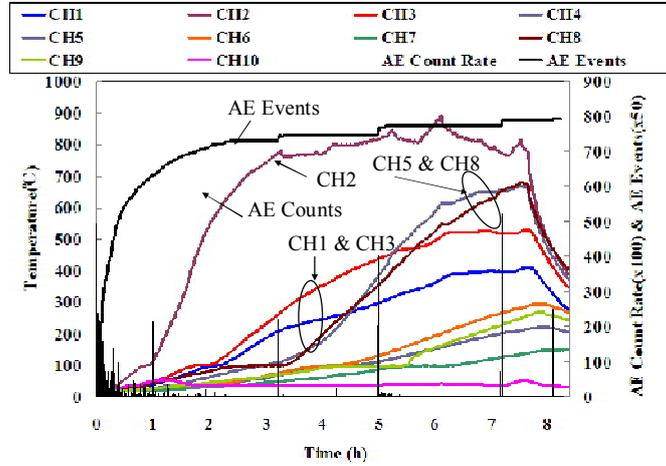
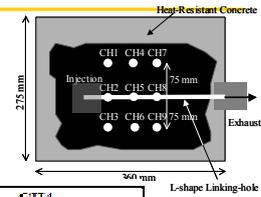
UCG基礎実験



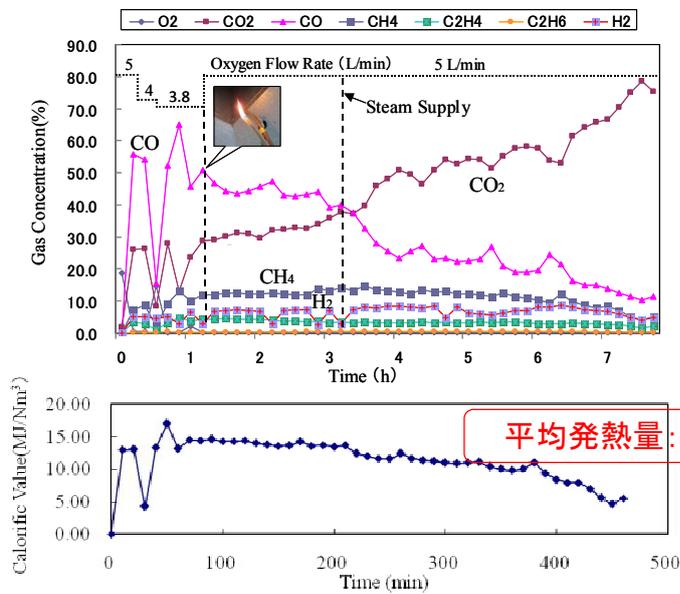
UCG基礎実験



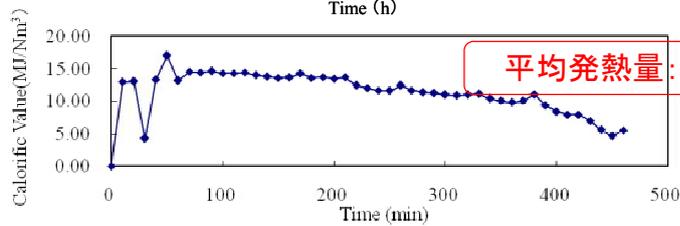
UCG基礎実験の結果



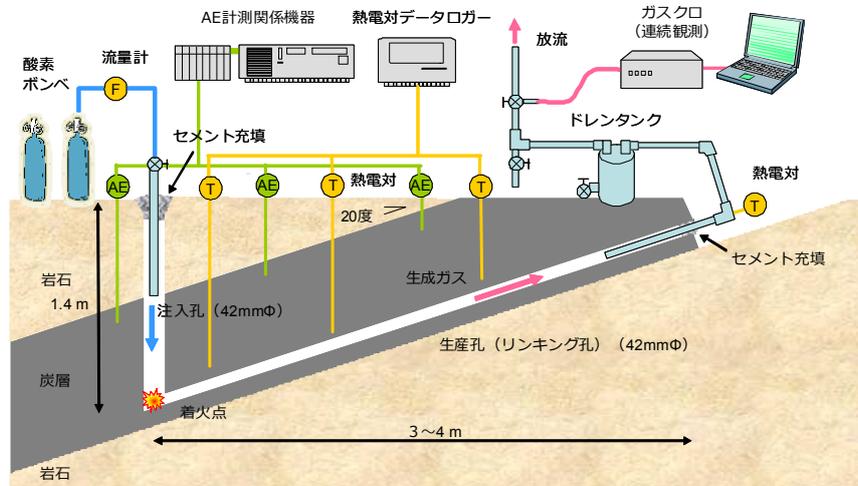
UCG基礎実験の結果



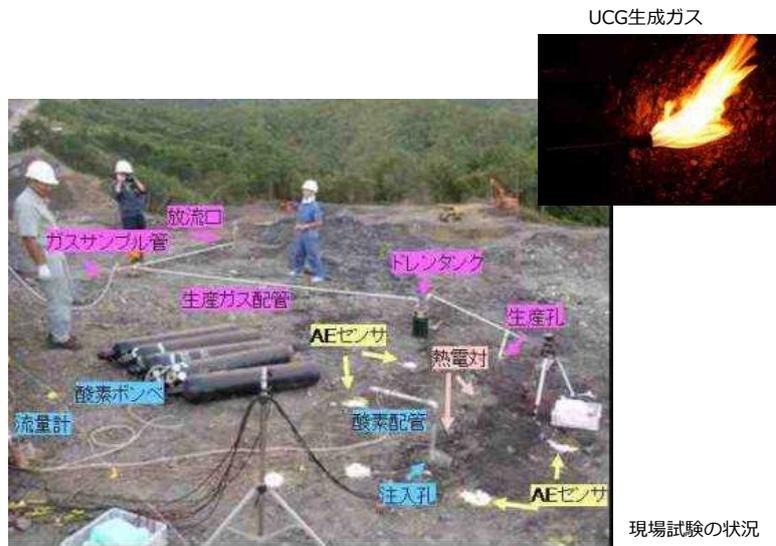
平均発熱量: 11.3MJ/m³



UCG小規模現場実験

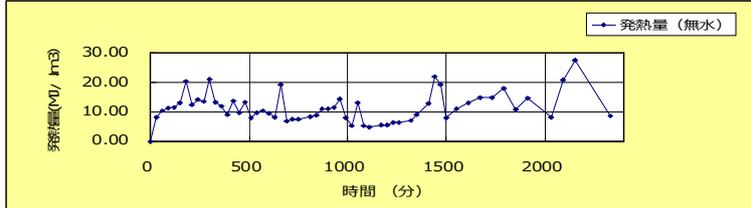
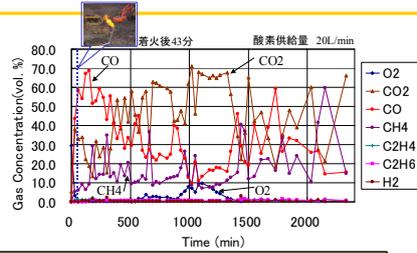


UCG小規模現場実験



実施現場：株式会社砂子組三笠露天坑 美唄層5番層

UCG小規模現場実験の結果



ガス成分	O ₂ %	N ₂ %	CO ₂ %	CO %	CH ₄ %	C ₂ H ₄ %	C ₂ H ₆ %	H ₂ %	発熱量 MJ/m ³
最大値	9.8	8.5	71.0	68.6	59.7	2.2	1.5	3.1	27.5
最小値	0.2	0.3	13.2	9.6	5.4	0.2	0.0	0.0	5.0
平均値	2.1	2.0	45.1	32.5	16.7	0.6	0.7	0.3	11.6

CBMとUCGを核とした低炭素地域エネルギー構想

