

未利用石炭資源有効活用に向けた 技術開発の現状

炭層メタン

(CBM : Coal Bed Methane)

石炭地下ガス化

(UCG : Underground Coal Gasification)

未利用石炭資源

- 従来技術による石炭採掘
坑内採掘/露天採掘
石炭輸入量(2014) 1億9千万トン
国内生産量130万トン (0.7%)

広域面積の開発⇒地域環境への影響が大きい
経済的・技術的な採掘限界⇒可採埋蔵量は少ない
石炭火力発電 ⇒ 低コストではあるが二酸化炭素排出量多い

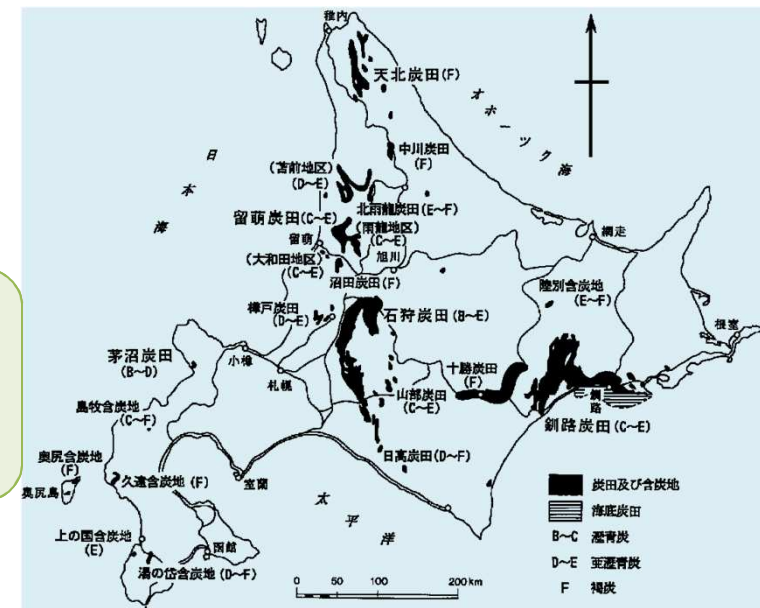
- 石炭を採掘しないエネルギー回収
炭層メタンガス (CBM)
石炭地下ガス化 (UCG)

ボーリングによる開発⇒地域環境への影響小
採掘に不適な石炭資源の開発が可能⇒可採埋蔵量増大
ガスとしてエネルギーを回収⇒よりクリーンな利用が可能

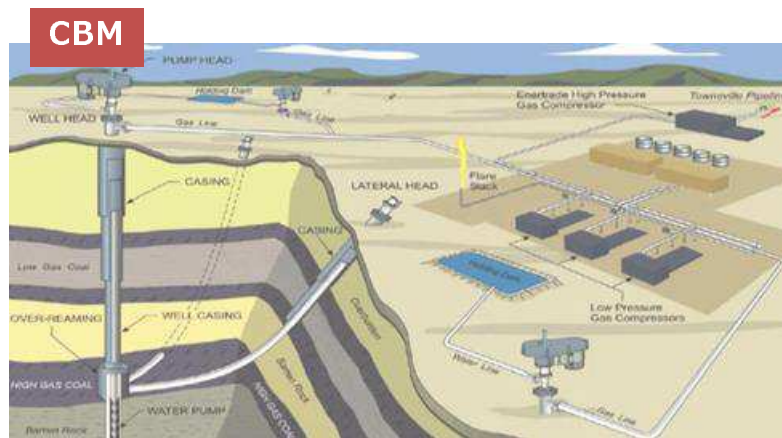
我が国の石炭埋蔵量 (億トン)

	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

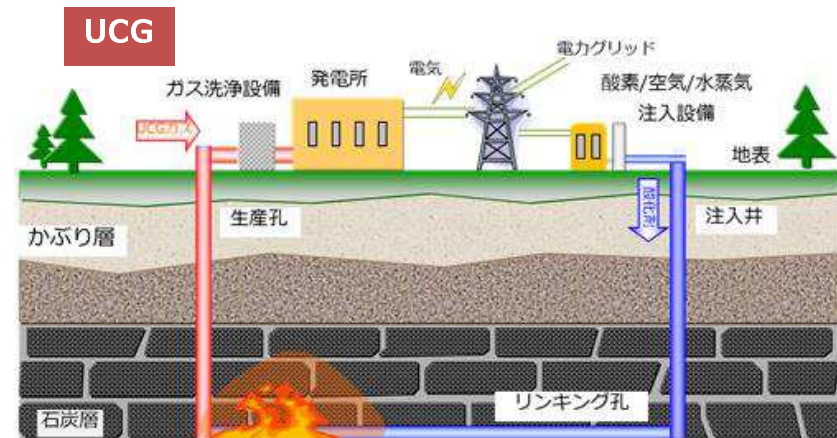
NPO法人地下資源イノベーションネットワーク調べ, 2008



CBMとUCG



WWW.CH4.com.au

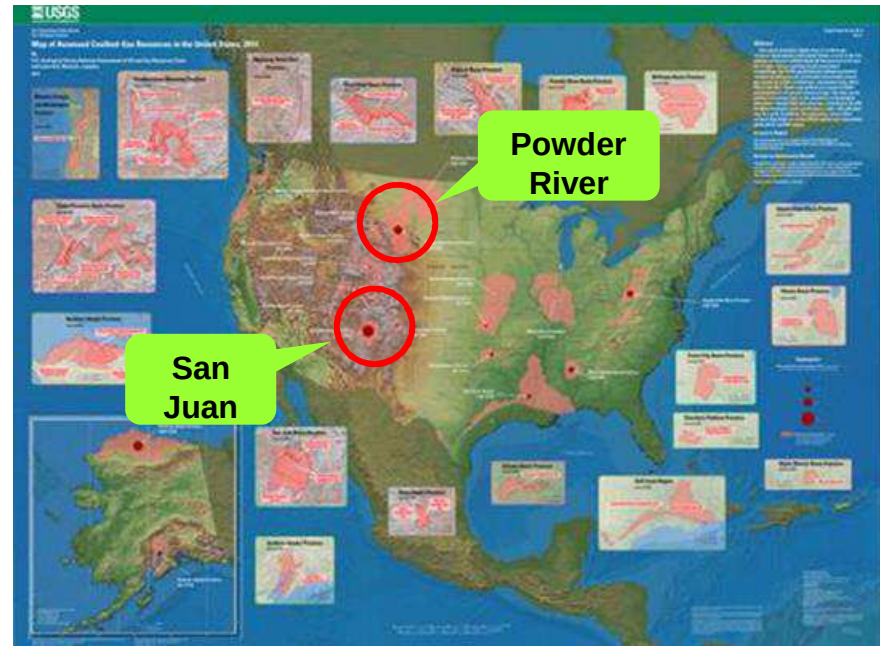


	CBM	UCG
開発対象	石炭層に含まれるメタンを主成分とする炭層ガス	原位置での石炭燃焼により石炭をガス化することにより生成する可燃性ガス
開発方法	地表ボーリング→揚水→ガス湧出	地表ボーリング→着火→酸化剤注入→生成ガス回収
生産エネルギー (石炭1トンあたり)	300～600 MJ/t-Coal	6,000～18,000 MJ/t-Coal
利用分野	発電、天然ガス代替、LNG	発電、GTL(液体燃料製造)、化学工業原料、天然ガス代替
環境課題	揚水による地下水位低下	ガス漏洩による地下水汚染 地表沈下
技術開発段階	アメリカ、豪州、中国などで大規模商業生産 指向性ボーリングによる高効率生産も実用化	豪州、カナダ、中国等で実証試験段階 商業生産プラントは未稼働

CBMの開発（アメリカ）

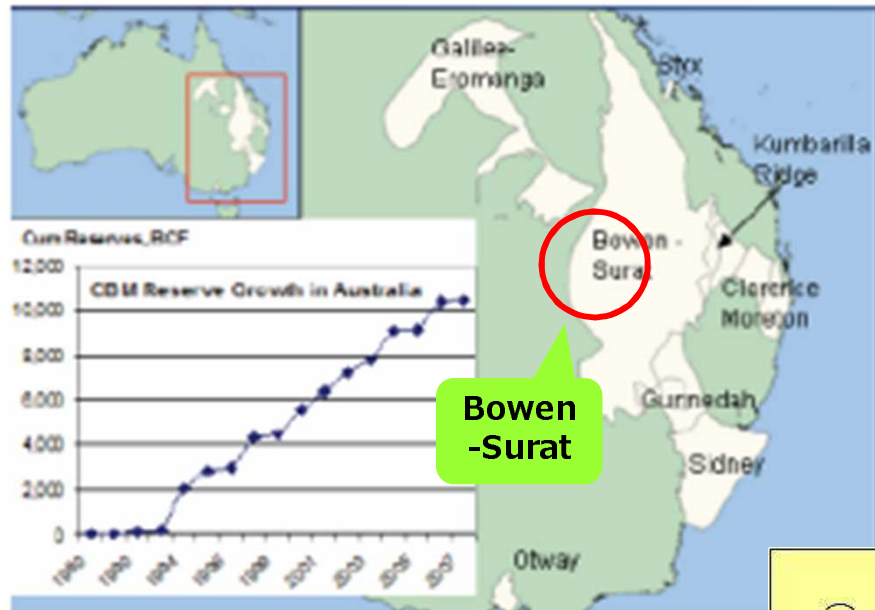
- CBM確認埋蔵量 3,480億m³ (2015)
- CBM生産量 353億m³ (2015)
- 全生産量の7割以上は San Juanと Powder Riverから
- 全天然ガス生産量の5%程度はCBM (2008年ピーク時には約9%)
- シェールガスの開発とガス価格の下落により生産量は減少傾向

米国のCBM資源
(USGS)



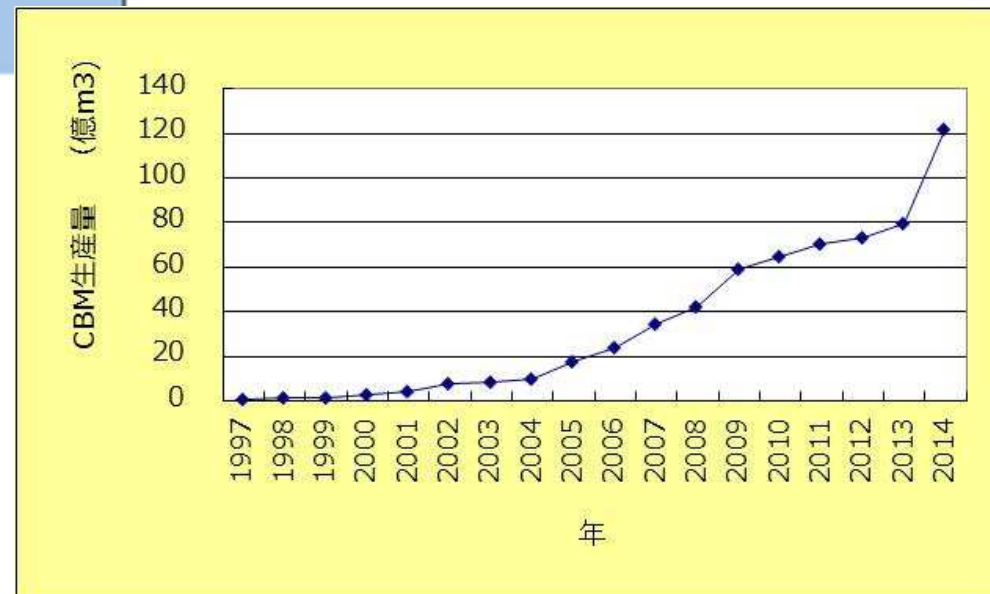
米国のCBM埋蔵量と
生産量 (EIA, U.S. DOE)

CBMの開発（豪州）



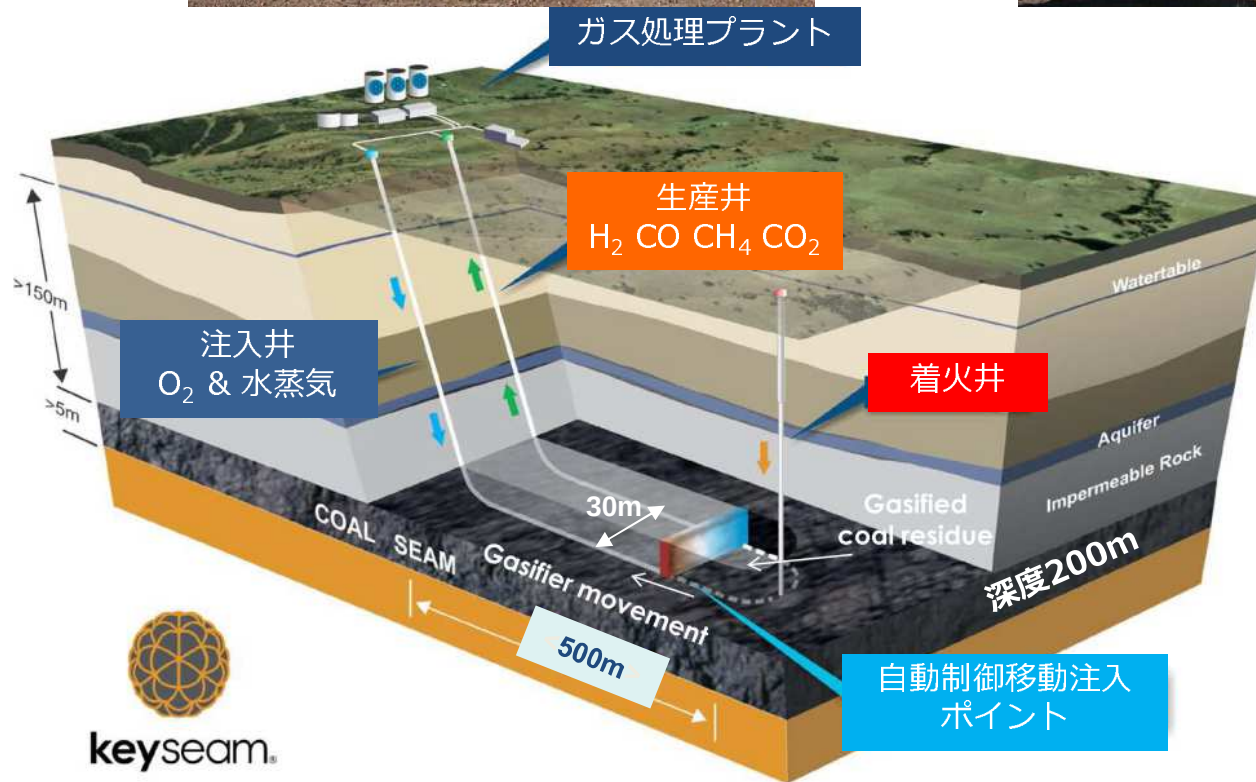
豪州の主要CBM開発炭田（IHS Inc.）

- CBM埋蔵量 1.2兆 m^3 (2015)
 - CBM生産量 122億 m^3 (2014/15)
 - 天然ガス生産量の19%はCBM (2014/15)
 - CBM生産はQueensland州が中心
 - 全埋蔵量の75%はBowen-Surat炭田
 - 2014/15年度の生産量は50%増
 - 海岸までパイプライン輸送し、LNGとして輸出（日本にも輸出）
- (*2008年以降の生産量はQueensland州のみの値)



豪州のCBM生産量
(Geosciences Australia & Energy Quest)

UCG実証試験：オーストラリア Bloodwood Creek (Carbon Energy)



100日試験

- 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 60m x 5m x 1.4
- 最終目標ガス生産レート：
1 PJ/Year
(天然ガス2,500万m³)

オーストラリア *Bloodwood Creek (Carbon Energy)*

- 2009年7月：5MW発電所建設開始
- 2010年8月：UCGパネル2及びパネル3の建設開始
- 2011年2月：UCGパネル2からの最初のガス生産
- 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）
鉾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)

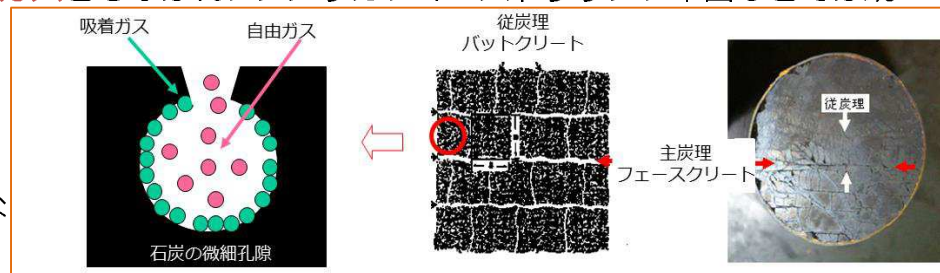


UCG現場坑井配置図

コールベッドメタン (CBM) とその資源量

炭層メタン (CBM) : 石炭層に含まれるメタンガス。石炭ができる過程で生成されたメタンガスが逸散することなく石炭の微細空隙内に吸着されている。非在来型天然ガスとも呼ばれ、アメリカ、オーストラリア、中国などでは既に大規模な商業生産が行われている。

- メタンガス濃度が高い (95 %以上) ➡ 天然ガスの利用技術・用途が適用可能
- 地表からのボーリングにより生産 ➡ 環境負荷が少ない
- クリーンなエネルギー ➡ 燃焼時のCO₂や汚染物質の排出が少ない
- 安定したエネルギー源 ➡ 太陽光や風力発電との組み合わせ

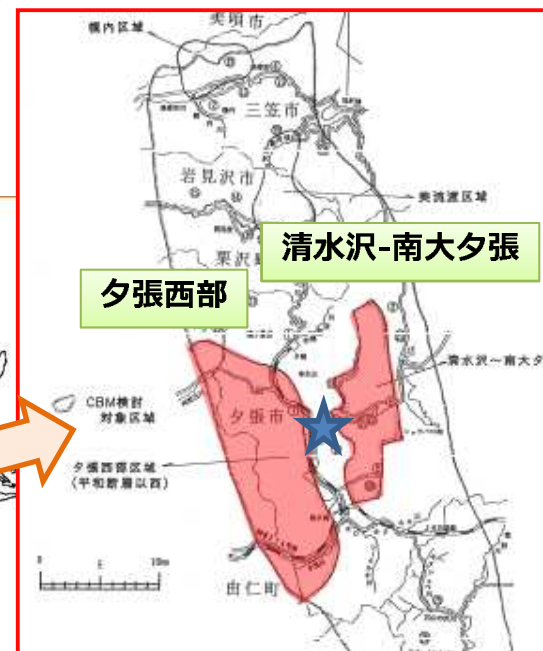
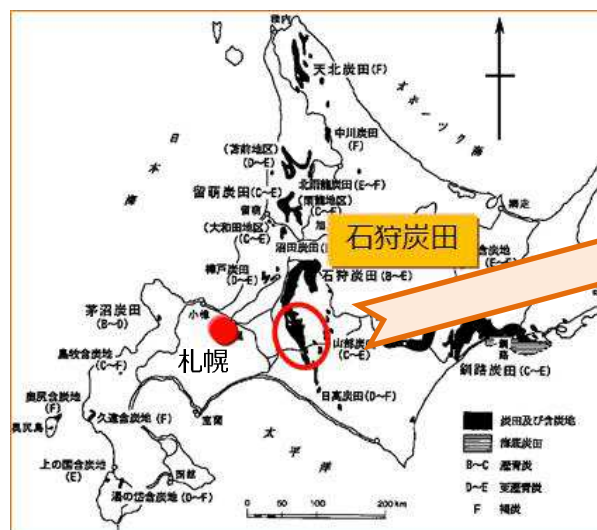


夕張のCBM資源量 : NEDOの調査 (1998年) では夕張清水沢地区に隣接する二つの区域をCBM有望地域として特定。

- 石狩炭田が我が国では最も有望な炭田で、中でも夕張地域には豊富なCBM資源が賦存
- 二区域の合計CBM資源量は77億m³ (夕張5,600世帯のエネルギー消費の1,000年分以上)
- 我が国の天然ガス生産量
約32億m³/年 (2012)*
- 勇払 (北海道) 天然ガス生産量
約3.6億m³/年 (2012)*

*天然ガス鉱業会, 石油・天然ガスノート, 2014)

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

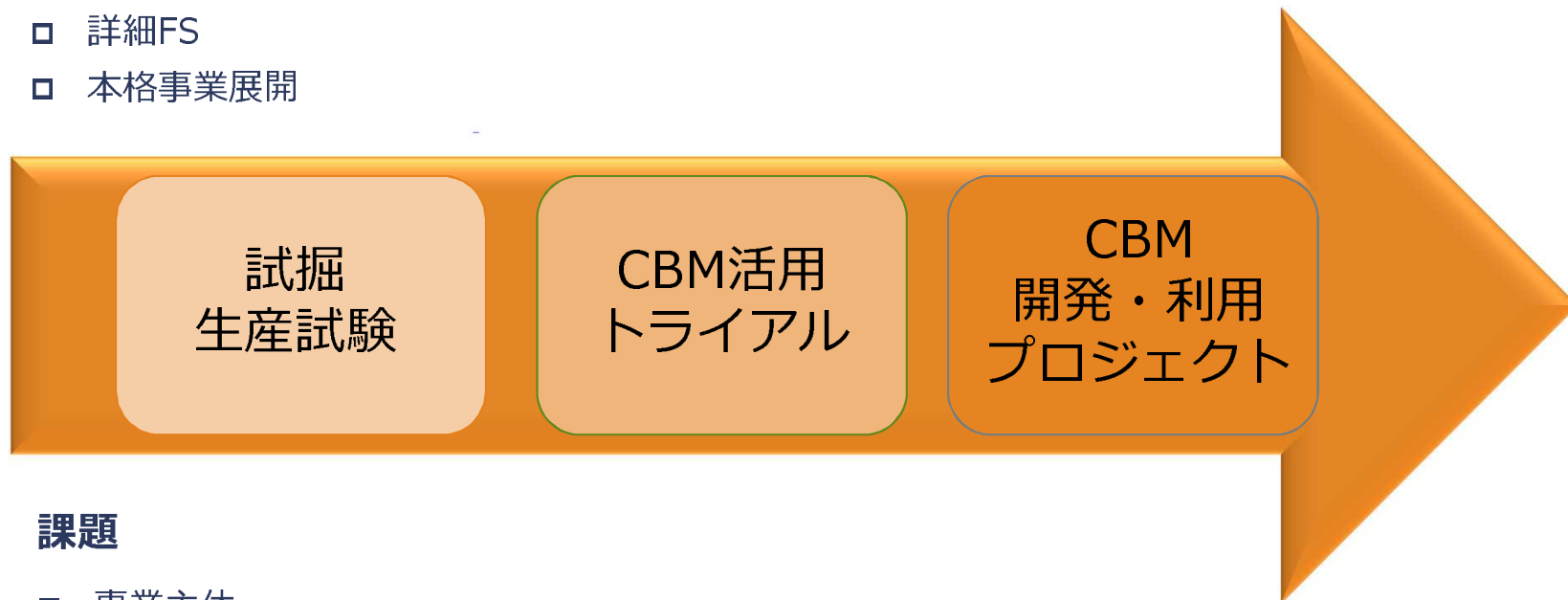


NEDO: 国内CBM資源調査
可能性調査(北海道地区), 1998

夕張CBM開発プロジェクト

現状とこれからの取組

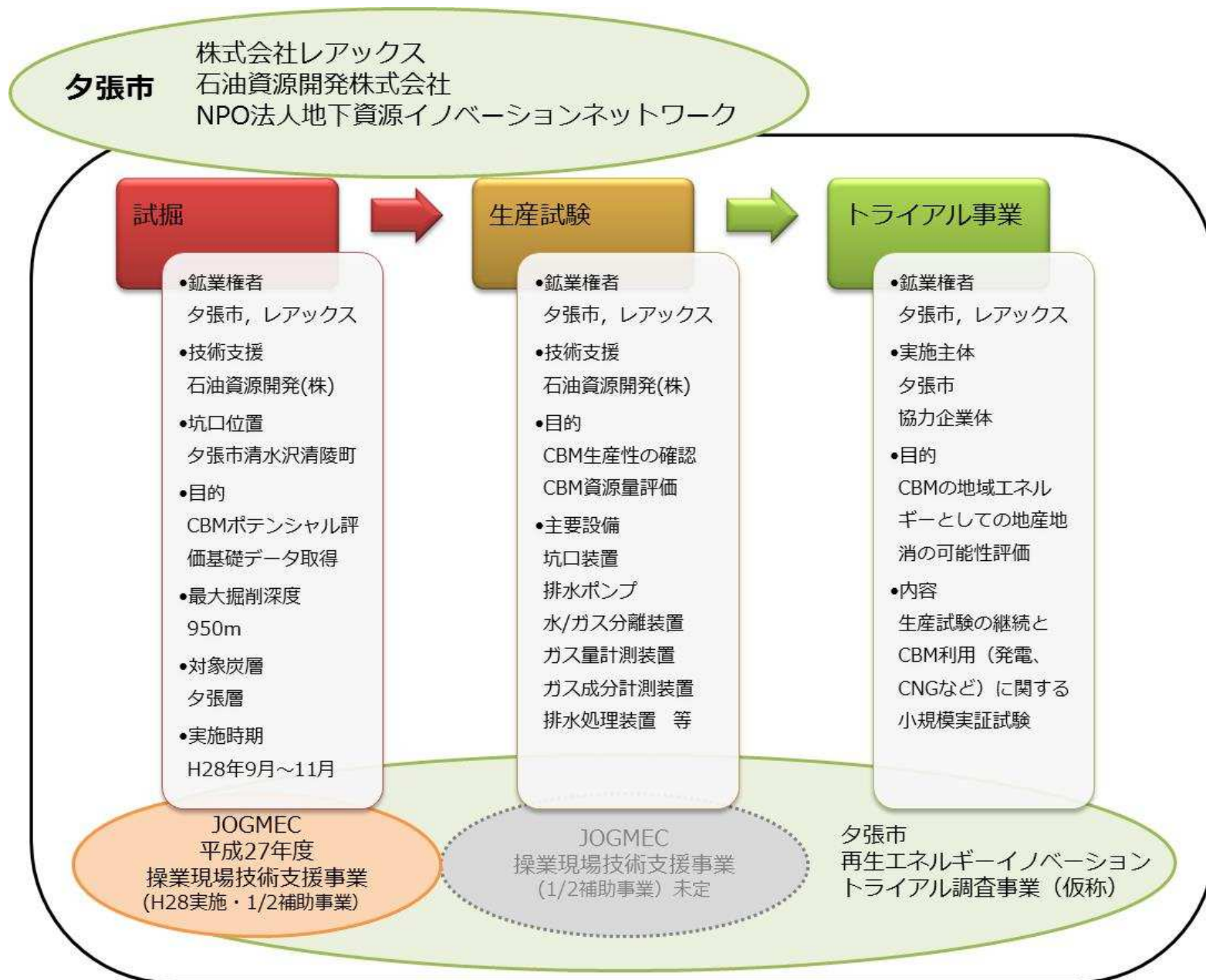
- 夕張市まちづくりマスタープランとの連携
地域活性化モデルケース（内閣府地域活性化推進室）として選定
「持続可能な地域社会の構築と地域エネルギーの有効活用による元気創造への取組み」
- 試掘/生産試験－資源量の確認/生産性予測
- CBM活用トライアル事業－試掘井を活用するCBM活用モデル
- 詳細FS
- 本格事業展開



課題

- 事業主体
- 最適エネルギーミックス－電力/熱/圧縮天然ガス（CNG）
- より安価で安定したエネルギーの供給
- エネルギー対価の地域内循環

夕張CBM開発に係る包括連携協定



CBM開発と試掘

CBM開発：

試掘

生産試験

トライアル
事業

経済性評価

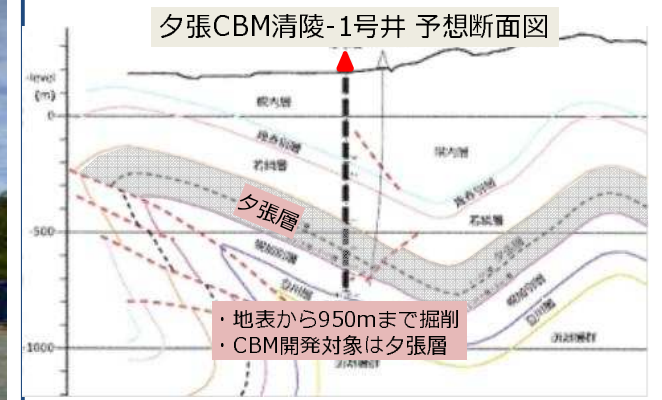
商業生産

- 試掘：地質条件や炭層の特性（ガス包蔵量やガス透過率など）把握
- 生産試験：一定期間ガス生産を継続し、生産性や資源量の評価
- 経済性評価：生産性試験結果をベースに、本格生産・利用モデルの経済性検討
- 商業生産：CBM生産井の掘削、生産設備・処理設備・利用設備等の建設・運用

試掘計画：

CBM開発を目的とした試掘は我が国では初。

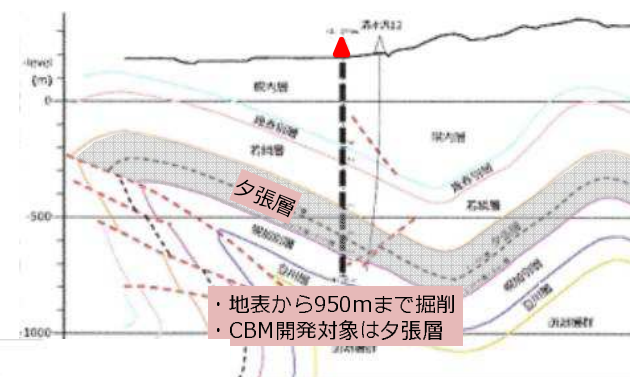
- 試掘井：夕張CBM清陵-1号井
- 掘削場所：夕張市清水沢清陵町39（旧清陵小学校跡地）
- 掘削深度：地表から950m
- CBM対象炭層：夕張夾炭層（8尺層，10尺上層，10尺層）
- 主な調査項目：
 - ・ 坑井地質調査・物理検層
 - ・ 石炭コア採取（ガス包蔵量調査含む）
 - ・ 石炭層浸透率評価のためのデータ採取
 - ・ 長期生産試験の仕様検討



出典：夕張市役所資料より作成

試掘井での石炭層（夕張層）確認深度と炭丈

炭層仮称	柱状図	掘削深度	炭丈	備考
上層群		677.3	1.1	コアサンプル 包増量計測
		680.4	0.6	
		690.5	0.3	
		699.5	0.4	
		704.4	0.4	



6.8尺層		803.3	1.9	
10尺上層		851.8	1.3	ガンパー対象
10尺層		863.5	1.2	ガンパー対象
10尺下層		876.6	2.5	ガンパー対象

石炭サンプルによるガス包蔵量測定

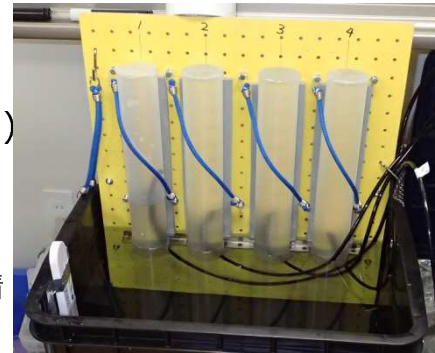
直接法によるガス包蔵量計測

- コア掘削 & コア回収
- 石炭サンプルをキャニスターに封入
- 重量測定（キャニスター+石炭サンプル）
- キャニスターを恒温槽（30℃）に入れる
- 水上置換にて脱着ガス量を計測（2～3週間）
- ルートt法*にて損失ガス量を推定**
- 石炭サンプルの含水比測定

*ルートt法：計測時間の平方根に対する計測当初の脱着量の直線近似から損失ガスを外挿して求める方法

**コア切削終了からキャニスター封入までの経過時間の1/2を損失時間とする

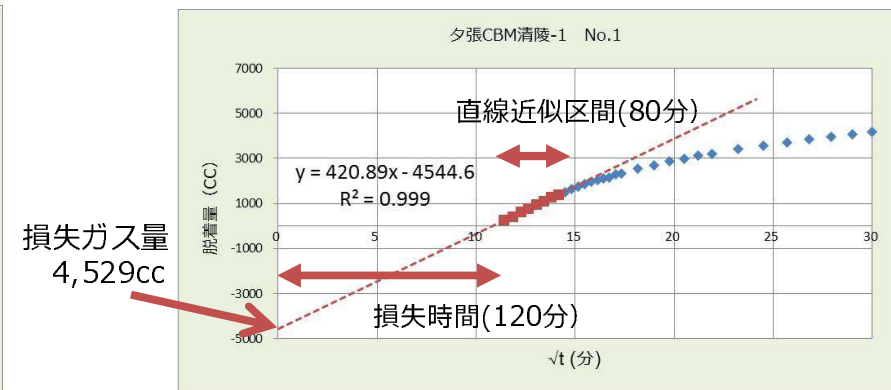
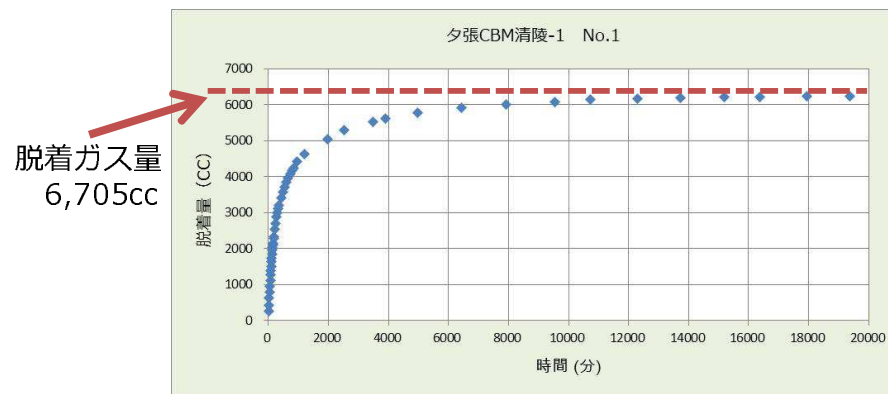
回収した石炭コア



水上置換による脱着ガス量の計測



キャニスターと恒温槽



$$\begin{aligned}\text{ガス包蔵量(cc/g)} &= (\text{脱着ガス量} + \text{損失ガス量} + \text{残存ガス量}^*) / w^{**} \\ &= 9.6 \text{ cc/g}\end{aligned}$$

*残存ガス量：（脱着ガス量+損失ガス量）の5%と仮定

**W:石炭サンプル乾燥重量（1,230 g）

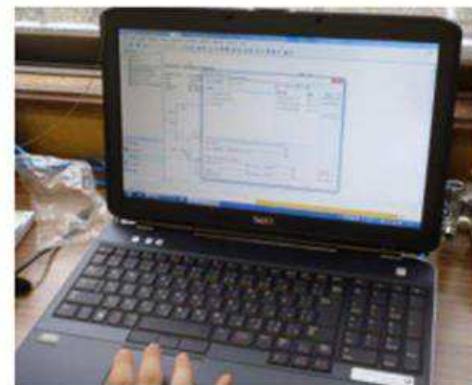
石炭サンプルからの脱着ガス成分

ガス成分分析結果

	H2	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	Total
分析値 (%) %	0.000	1.855	8.242	81.259	0.000	3.618	0.000	0.051	95.025
Air free 補正 %	0.000	0.000	1.352	81.259	0.000	3.618	0.000	0.051	86.280
Dry 補正(100%補正) %	0.000	0.000	1.567	94.181	0.000	4.193	0.000	0.059	100.000

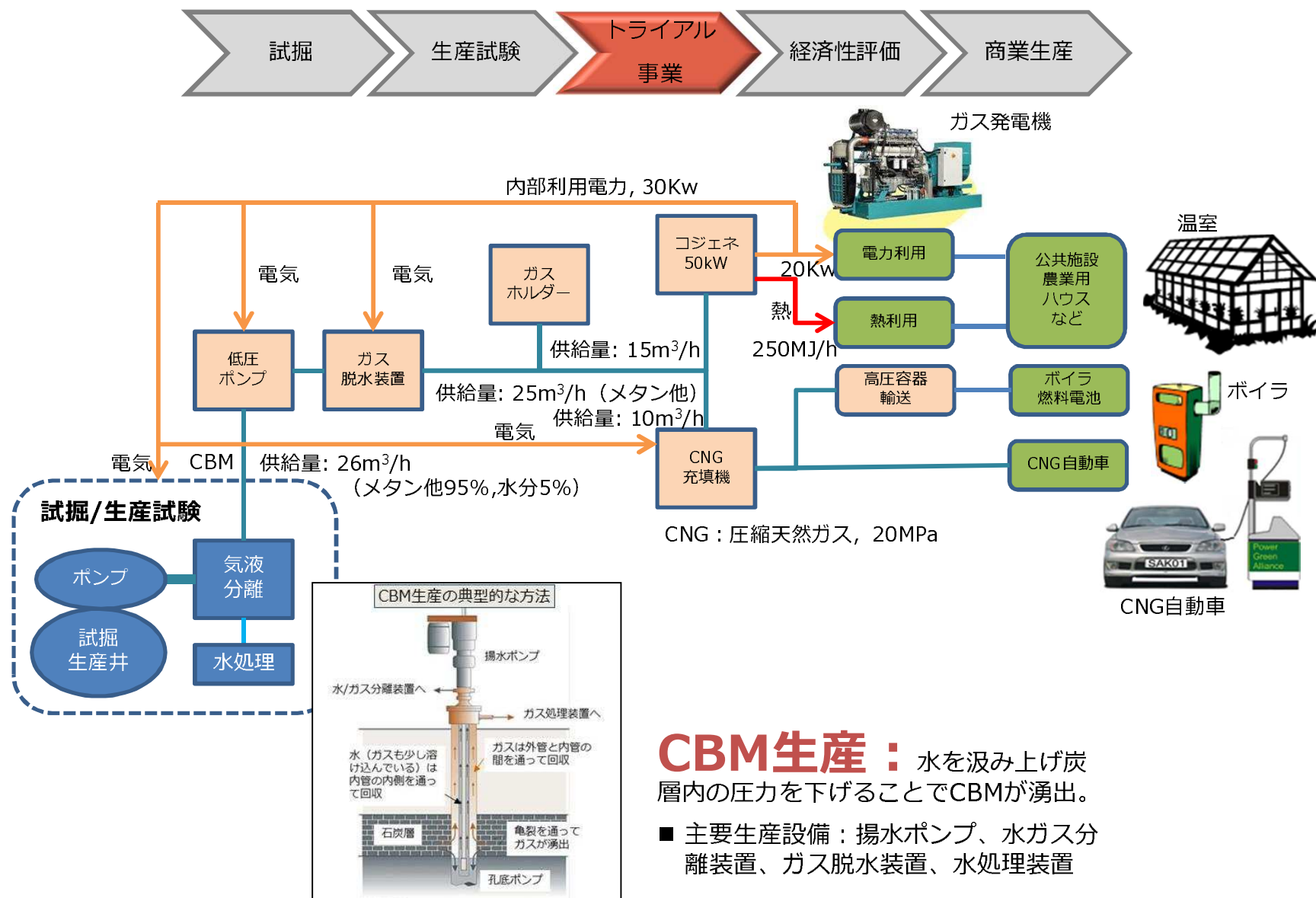


脱着ガスのサンプリング



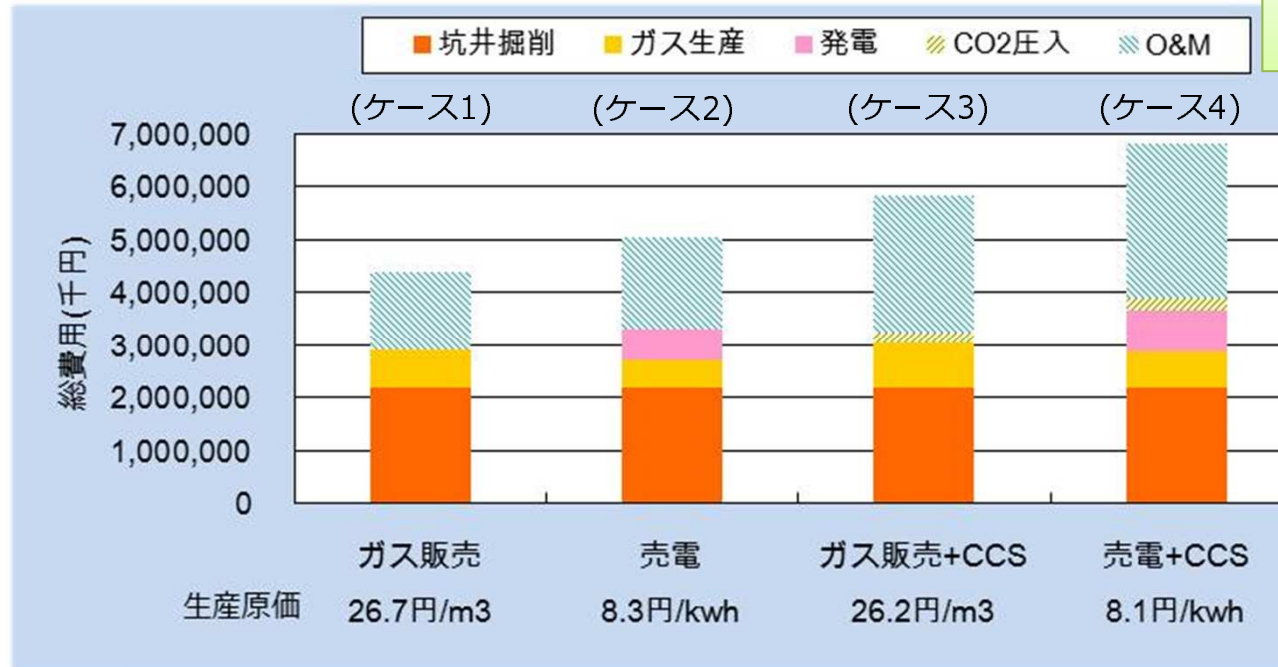
マイクロガスクロ本体（左）と制御用PC（右）

CBMを活用した地域循環トライアル調査事業のイメージ



ローカルエネルギー供給モデルの経済性

CBM利用形態別総費用と原価



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

3,200万KW h/年平均

(ケース2)

4,400万KW h/年平均

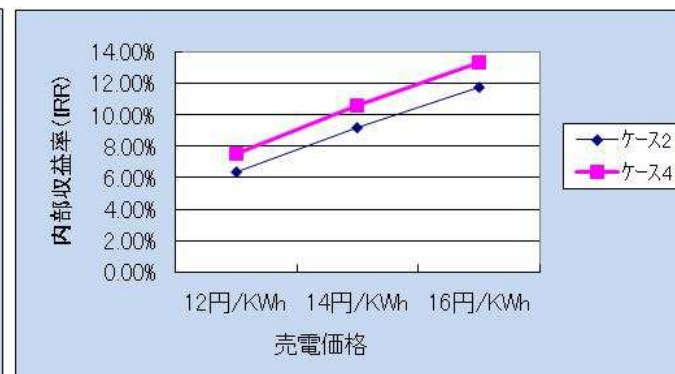
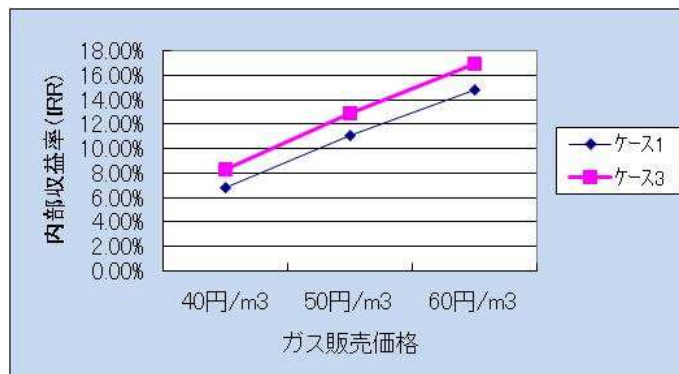
(ケース4)

CBM内部消費量

20 %

CO₂分離・回収コスト

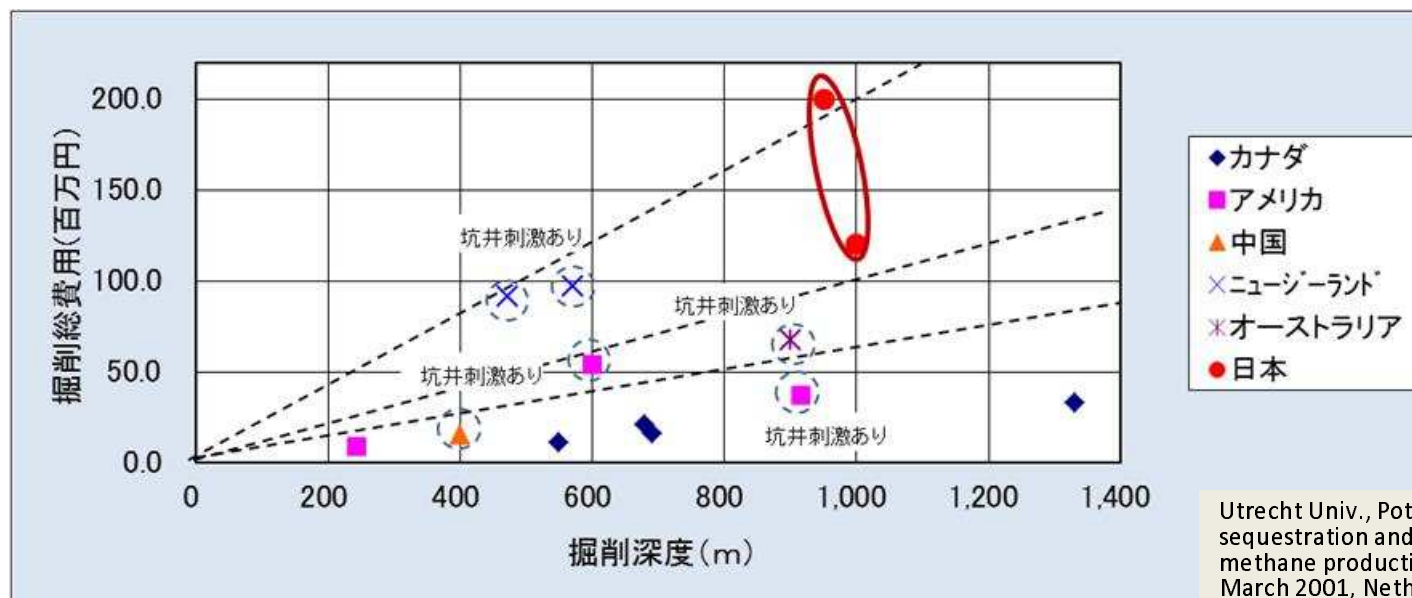
3,000 円/t-CO₂



内部収益率の計算

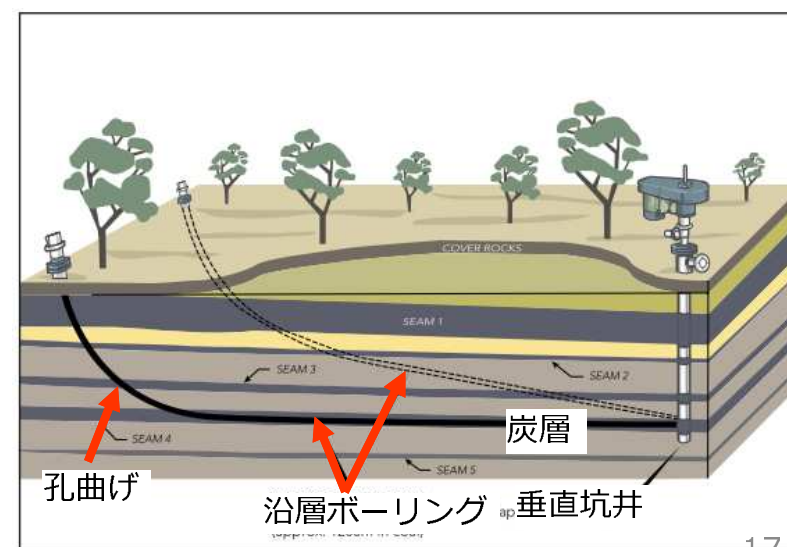
掘削コスト削減の可能性

CBM坑井掘削費用の比較

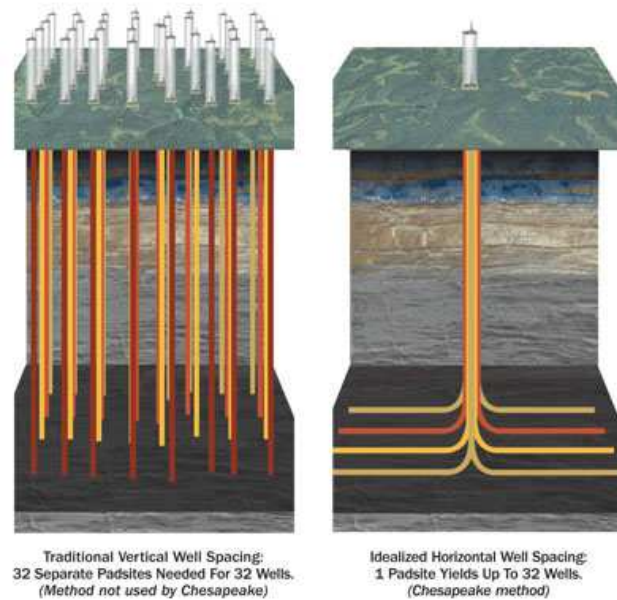


- CBM生産量 $\propto$ ガス包蔵量・浸透率・圧力差
炭層との接触面積
- 炭層内の坑井長さを増大
 - ➡ 1本当たりの生産量の増大
 - ➡ 掘削坑井数の削減

方向制御掘削技術の適用

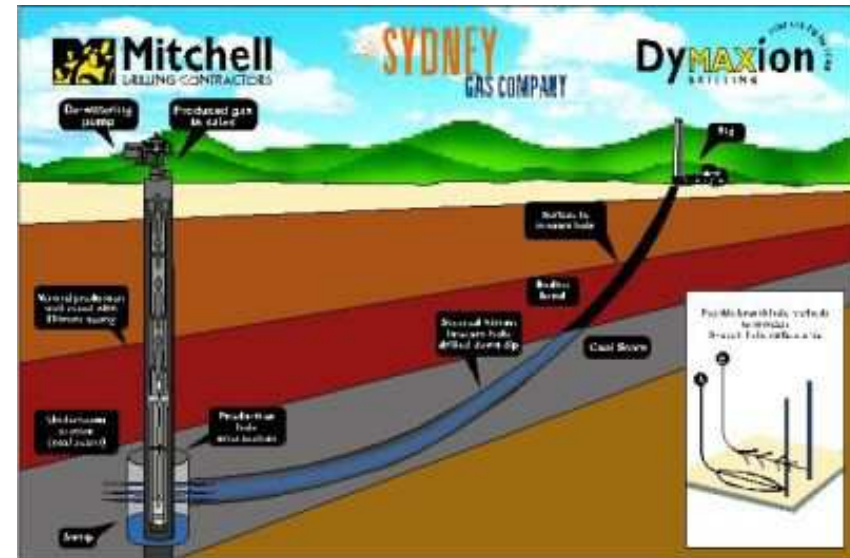


より高効率なCBM生産

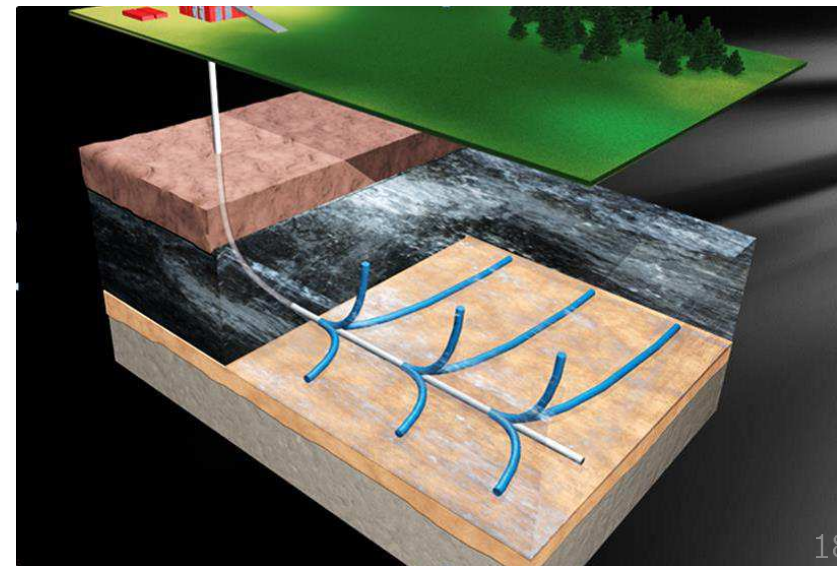


<http://energyindepth.org/ohio/>

ガス包蔵量は多いが浸透率が低いケースでも、地上からの指向性ボーリング技術の発達により、高効率なCBM生産が行われるようになった



<http://www.energynewspremium.net>



<http://www.hydrocarbonrecovery.com>

CBM開発・利用は安全か？

◆ CBMの試掘・生産

- ✓ 鉱業法の下では「可燃性天然ガス」の範疇に区分され、試掘・生産には鉱業法によりその計画、安全対策、企業の技術力、経済力が厳しく審査
- ✓ 鉱山保安法の適用も受け、安全なCBM生産が義務付け
- ✓ 天然ガス開発分野で既に開発された高度な安全対策技術の適用が可能
- ✓ 夕張地区の炭層上部には、泥岩と頁岩が互層をなす幌内層が数百mの厚さで賦存しており、キャップロックの役割を果たし、垂直方向の流体移動（漏洩）を制限
- ✓ CBMの生産圧力は一般的に天然ガス生産の圧力より低いのでより安全
- ✓ ボーリング孔には鋼製ケーシングを挿入し、その外側は遮水セメントでシール（漏洩防止）

◆ CBMの利用

- ✓ 空気より軽く、液体燃料の様に地上に滞留することなく大気中に拡散
- ✓ 他の燃料より燃焼下限界が高く（約5%）、自然発火温度も高い（約540℃）
- ✓ 一酸化炭素などの毒性物質を含まず、ガス中毒の危険性がない
- ✓ 天然ガスとほぼ同じ成分であるため、安全に利用するための法律・ガイドラインが整備

CBM開発・利用が環境に与える影響は？

◆ 大気

- ✓ CBMは天然ガスと同じメタンを主成分とするクリーンなエネルギー
- ✓ 石炭や石油と比べて、燃焼時の硫黄酸化物(SOx)、窒素酸化物(NOx)、二酸化炭素、煤塵の発生が少ない
- ✓ CBM燃焼ガスエンジンやボイラには排ガス規制が適用

◆ 騒音

- ✓ 生産井や生産・供給設備の建設・操業には環境基準が適用
- ✓ 周辺環境（住宅等）にも配慮した設備設置

◆ 水質

- ✓ CBM生産で排出する水（炭層水）には有害物質は含まれない（経産省補助事業で実証済み）
- ✓ 簡便な廃水処理で河川放流可能な水質に
- ✓ 炭層より上位の地下水はケーシングと遮水セメントにより生産井とは隔離
- ✓ 30℃近い温度であり低温熱利用や融雪水としての利用可能性

◆ 自然環境

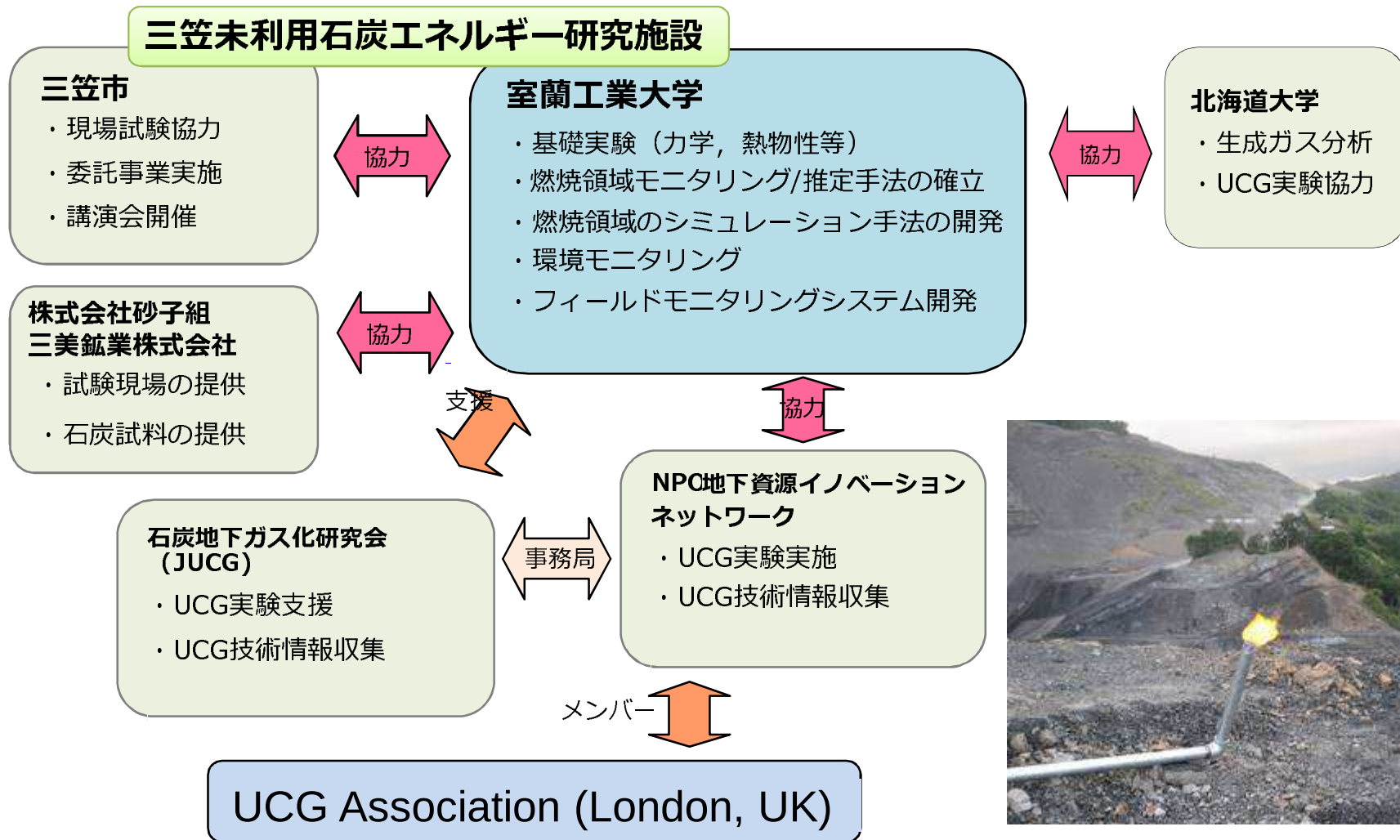
- ✓ 石炭の採掘と比較して地表部の開発面積は少ない
- ✓ 試掘・開発には関係官庁との事前協議により自然環境には十分な配慮

まとめ

- ◆ **未利用エネルギー資源/炭層メタン（CBM）をローカルエネルギーの中核として活用**
 - ➡ エネルギーの地産地消、クリーンなエネルギー、安定したエネルギー源
 - ➡ 既存技術での開発・利用が可能
 - ➡ ゼロエミッション発電の可能性、低炭素社会構築に貢献
 - ➡ 電力・熱・燃料としての複合利用によるまちづくりへの貢献・地域経済活性化
- ◆ **事業化には試掘/生産試験・トライアル事業による資源量評価・経済性評価が不可欠**
 - ➡ 相当額の先行投資が必要
- ◆ **事業化コストの低減**
 - ➡ 掘削コストの低減
 - ➡ 坑井の生産能力向上（指向性ボーリング技術の活用、坑井仕上げの改善）
- ◆ **課題の克服**
 - ➡ 試掘/生産試験他の実施資金の確保
 - ➡ 試掘/生産試験 ⇒ 事業化モデル構築と経済性評価
 - ➡ コスト低減/生産効率向上に向けた技術の集積と実証
 - ➡ “エネルギー開発”から“まちづくり”の視点への転換

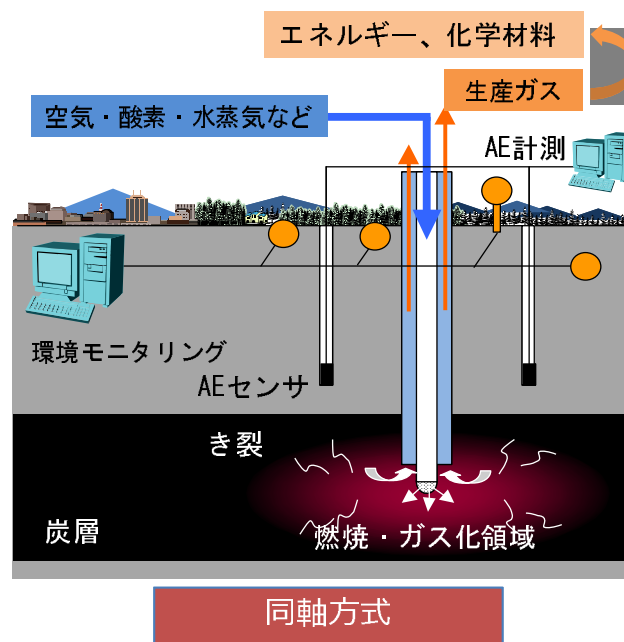
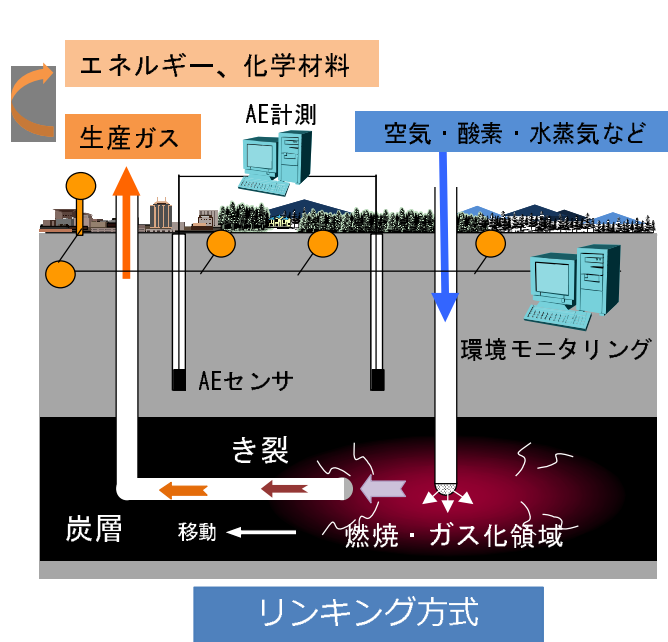
試掘/生産試験の実施 ➡ **高効率生産による事業化**

三笠市におけるUCG研究協力体制

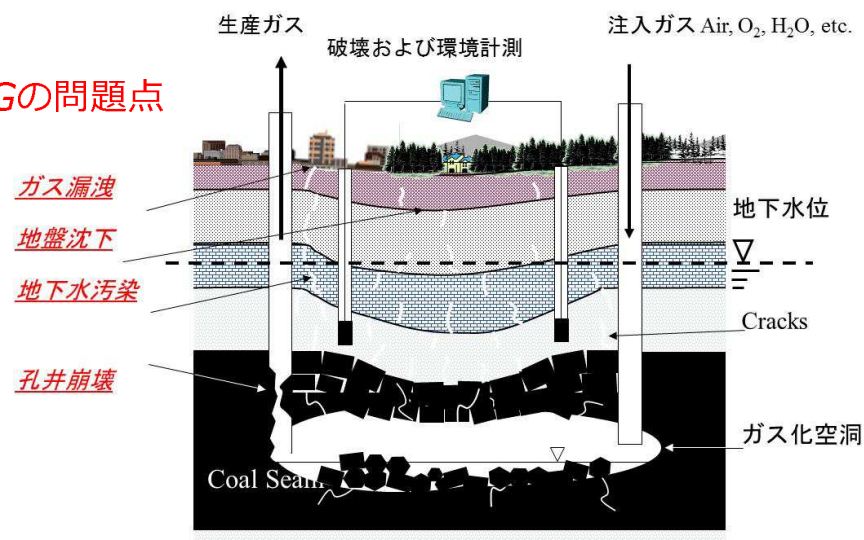


UCG現場試験（砂子炭鉱，三笠市）
2011年8月22日

UCG: 二つのシステム開発と課題

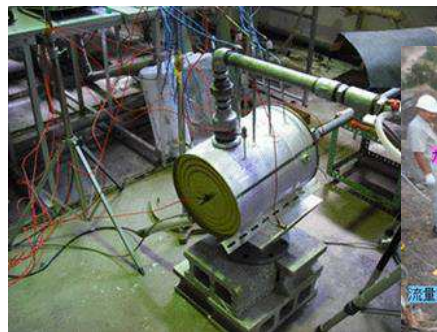


破壊に起因したUCGの問題点



克服すべき課題

これまで実施してきたUCG基礎実験



小ブロック実験



露天炭鉱実験



人工炭層実験



ブロック炭実験

これまでのUCG実験（三笠未利用石炭エネルギー研究施設での実験）

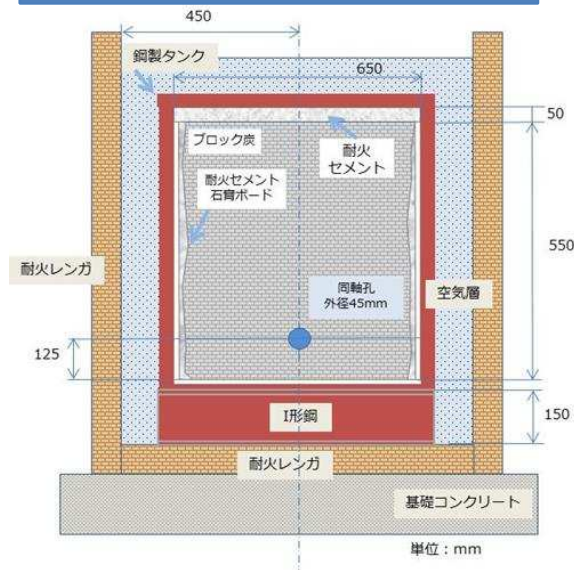
三笠市UCG実証実験委託業務として実施



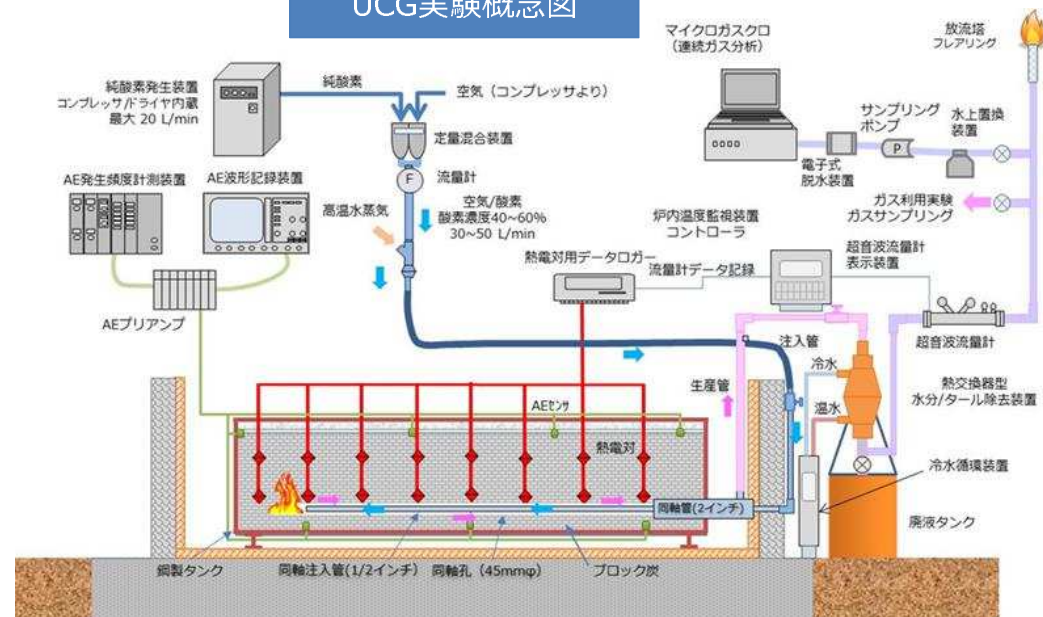
UCG実験炉



大型ブロック炭試料の構成



UCG実験概念図



水平同軸UCG：水平に穿孔した同軸孔の先端部で着火し、口元に向けて順次燃焼/ガス化領域が拡大

石炭ブロックの採取（H28年：三美鉱業(株)）



写真 2-1 重機による切削作業



写真 2-2 人力による切出し作業



写真 2-3 ブロック形状の最終整形

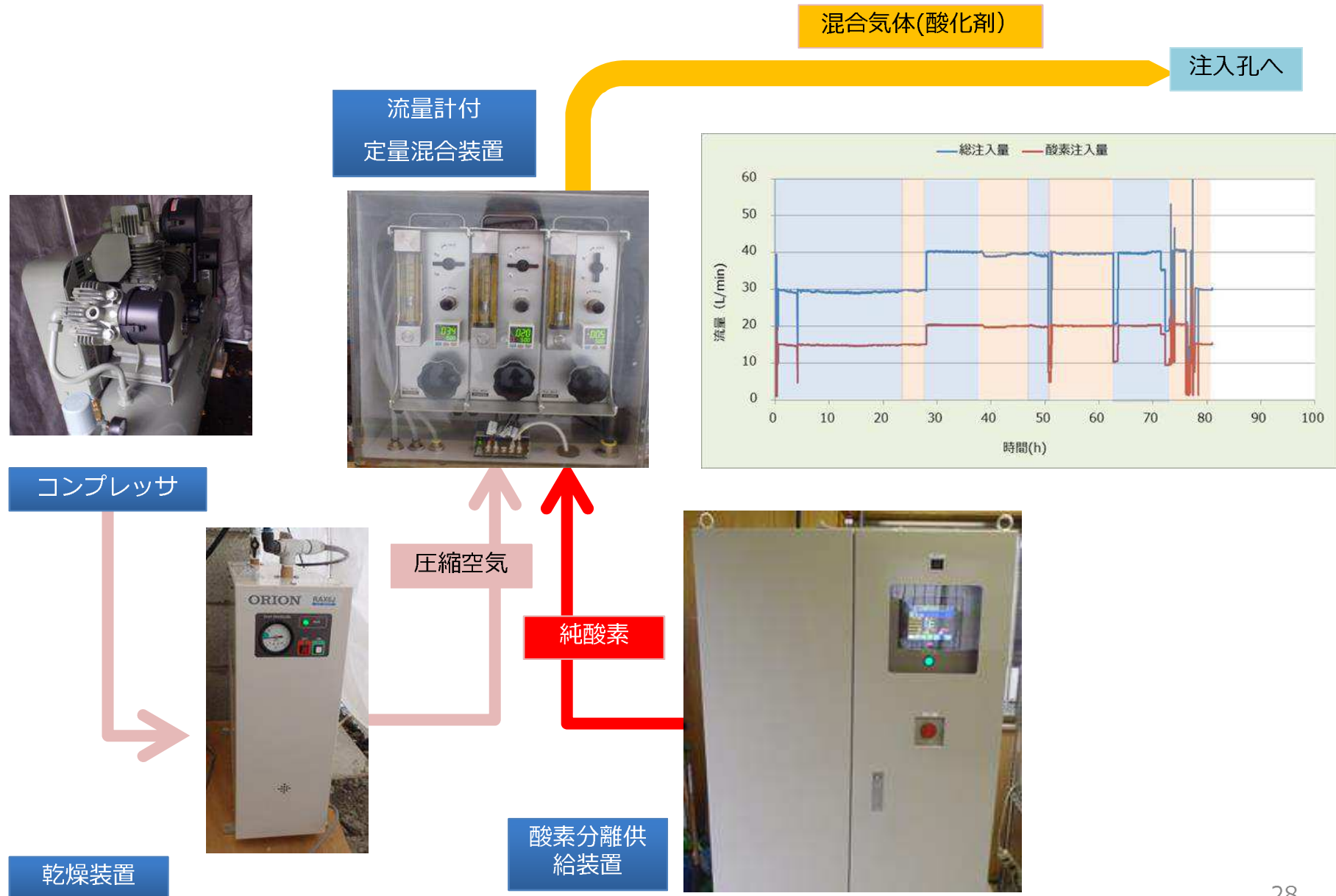


写真 2-4 切出した石炭に鋼製容器を被せる

計測/観測項目

- ガス化剤（空気/酸素/水蒸気）注入量
- 生成ガス流量（超音波流量計による）
- 生成ガス成分
（マイクロガスクロによる連続観測、30分～1時間毎）
- 生成ガスサンプリング
（大学研究室での詳細分析用、1日数回）
- 炭層内温度/生成ガス温度（計20点）
- AE（微小破壊音）（6～8点、発生頻度計測と震源解析）
- 二酸化炭素・窒素注入による消火効果（主に温度計測）
- 実験終了後の燃焼・ガス化領域の観察（解体時）

ガス化剤（空気/酸素）注入量



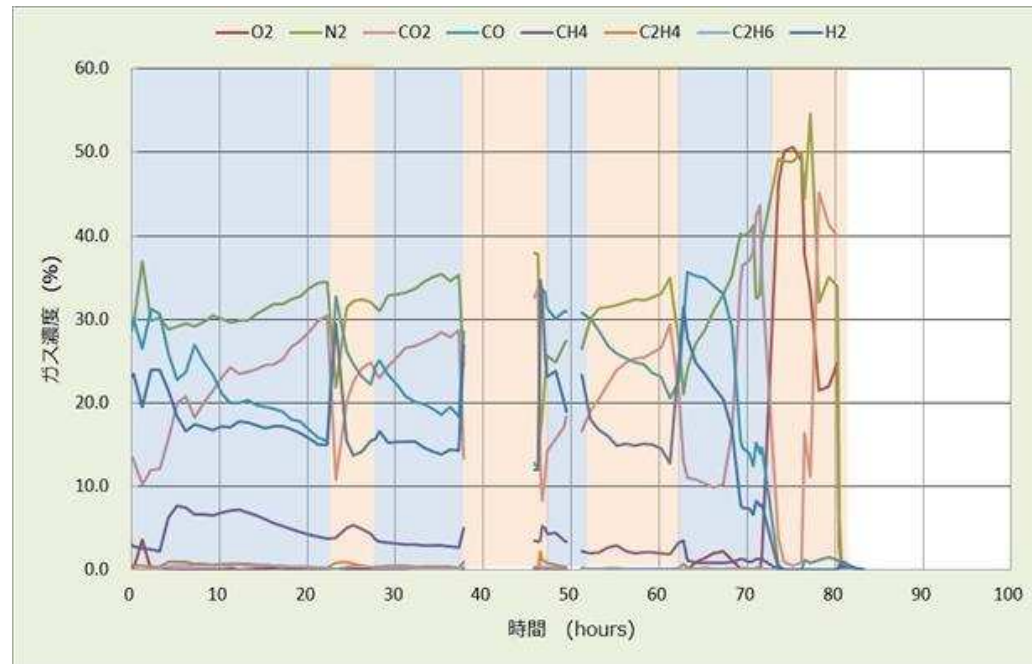
生成のガス成分と発熱量

- マイクロガスクロによる連続観測
30分～1時間毎の自動サンプリング/分析
- 定期的なマニュアルガスサンプリング
大学研究室での詳細分析用

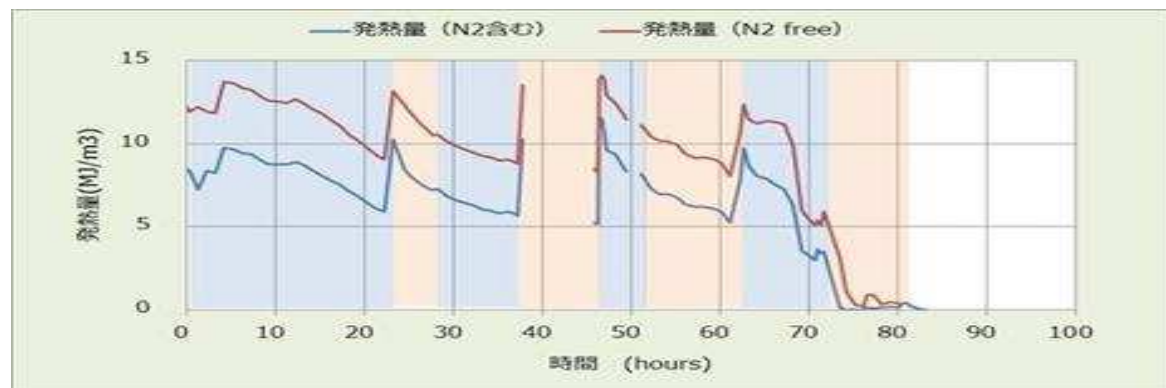
マイクロガスクロ



生成ガス成分解析結果(上) と発熱量(下)

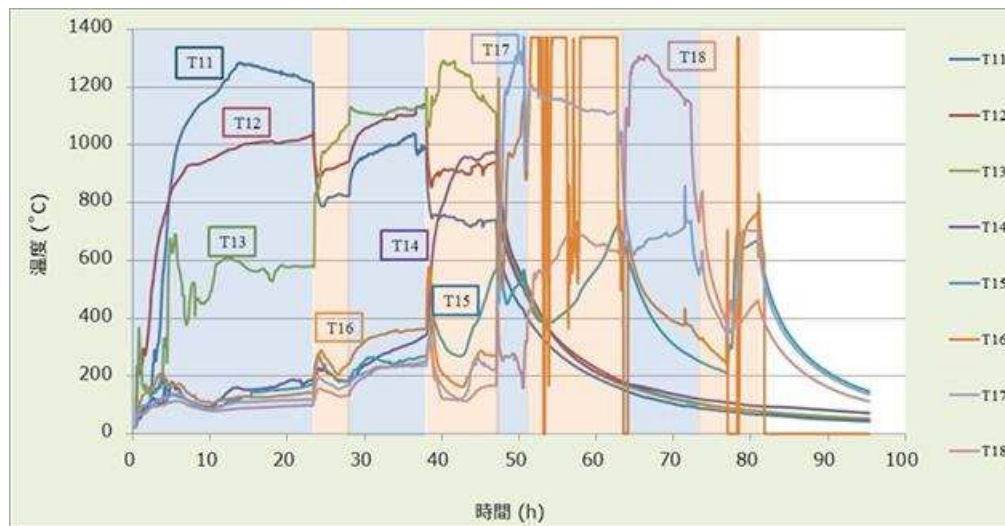
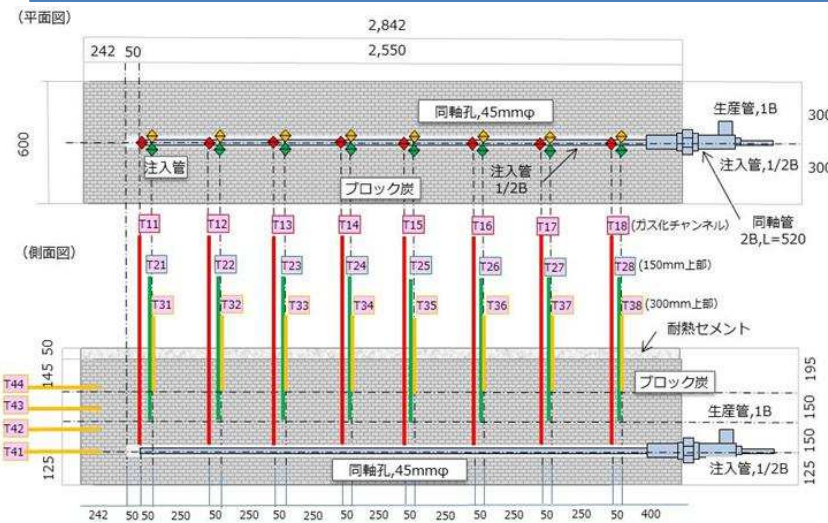


電子式脱水装置



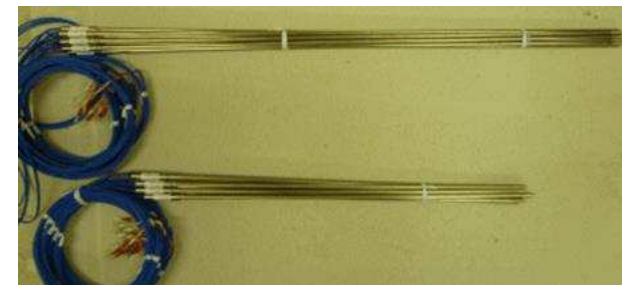
炭層内温度/生成ガス温度（計28点）

人工炭層内の熱電対の配置（上）と温度変化（下）



- 高温用熱電対による計測
- 石炭ブロック内温度（28点）

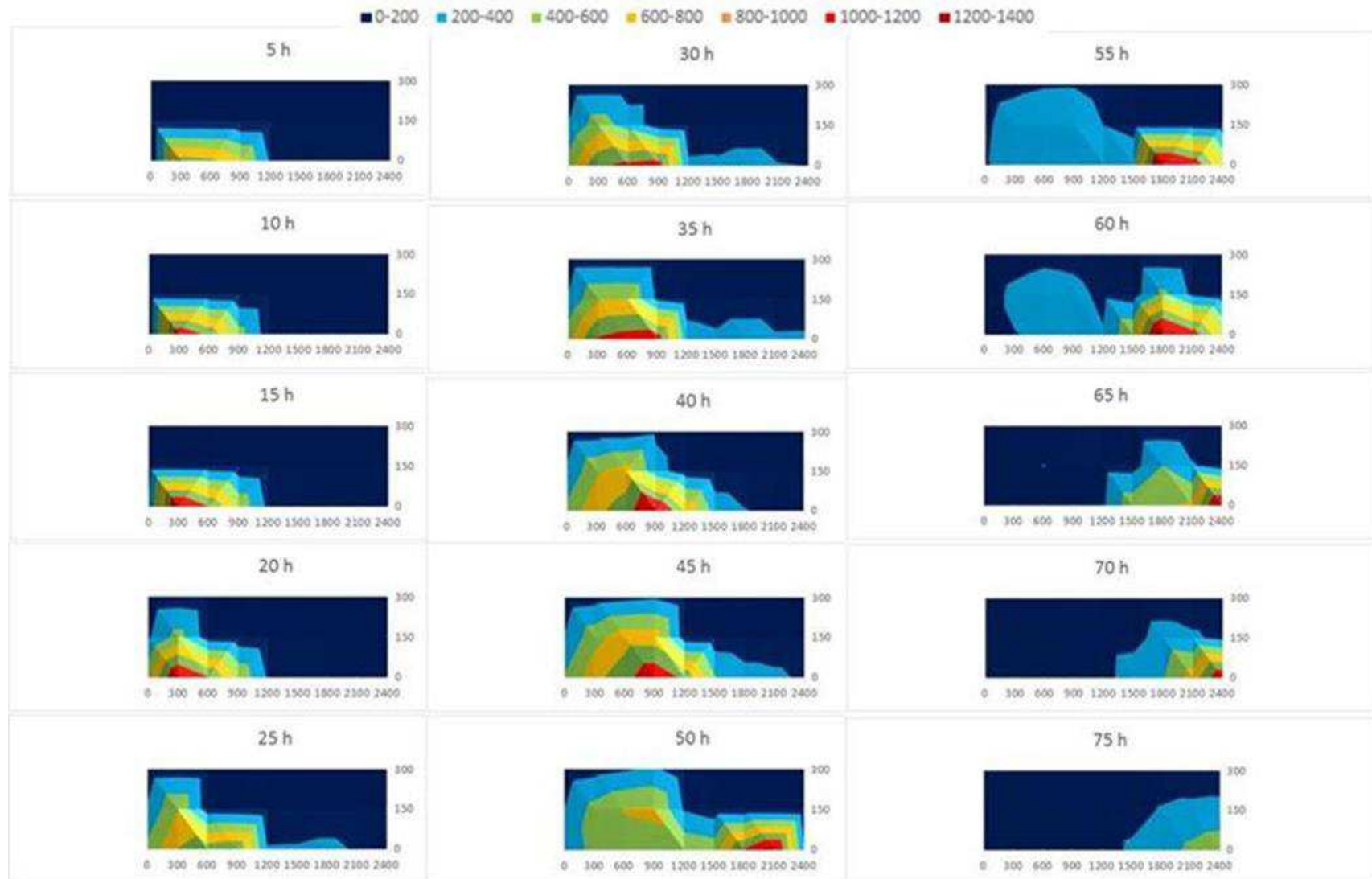
高温用熱電対



熱電対用データロガー



炭層内温度：燃焼領域/ガス化領域の広がり



AE発生頻度と震源解析

AEセンサ

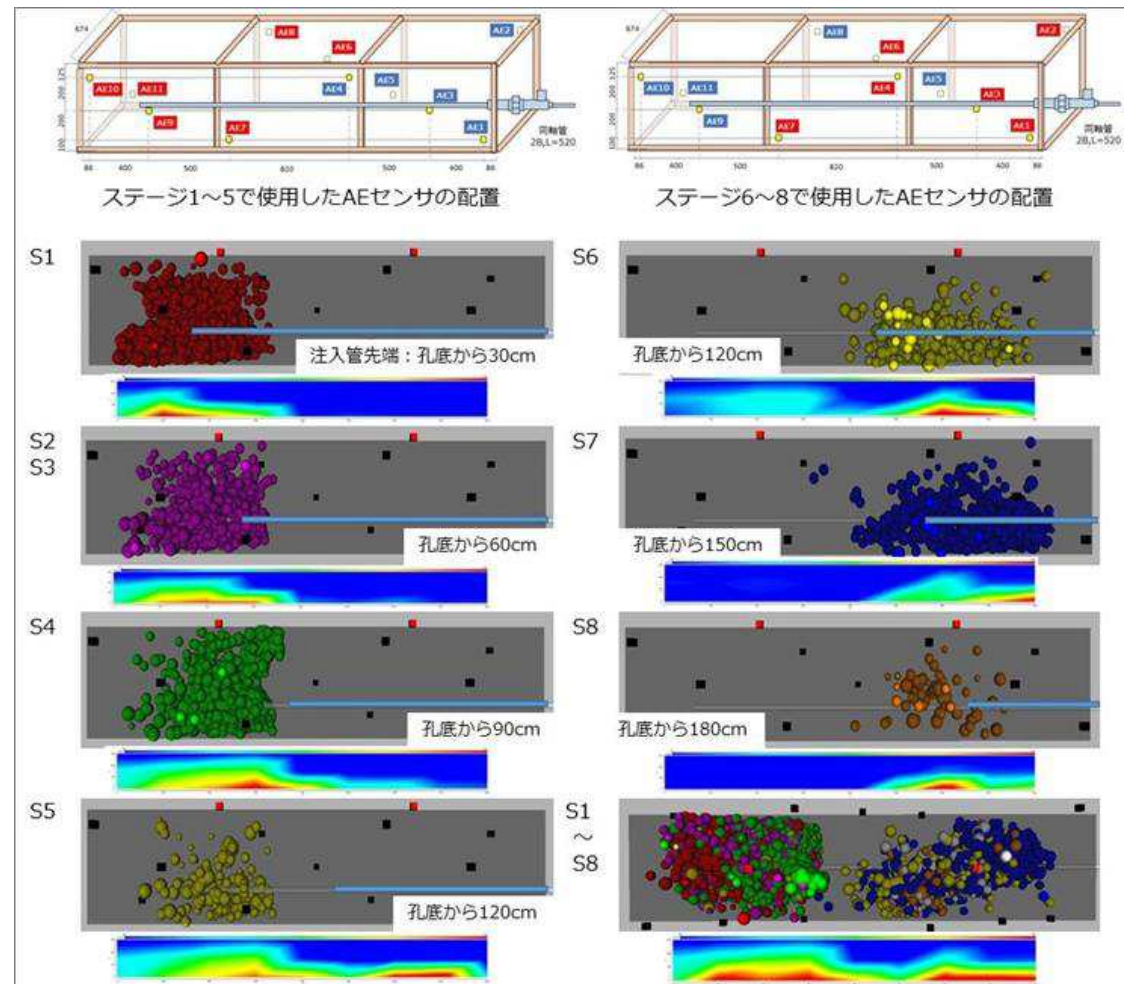


AE観測録装置



AE震源解析例

(震源分布と相対エネルギー)



燃烧終了後の試料断面観察

実験終了後の代表的な試料縦断面



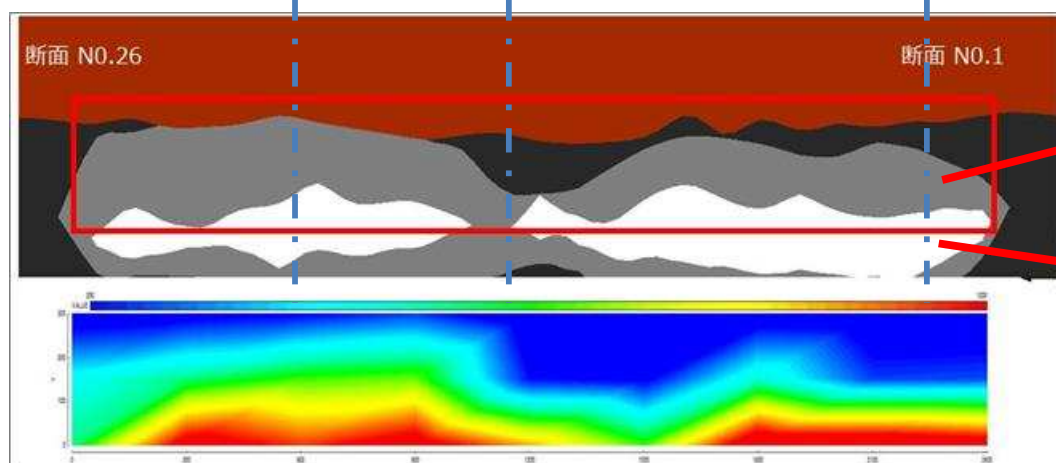
断面20



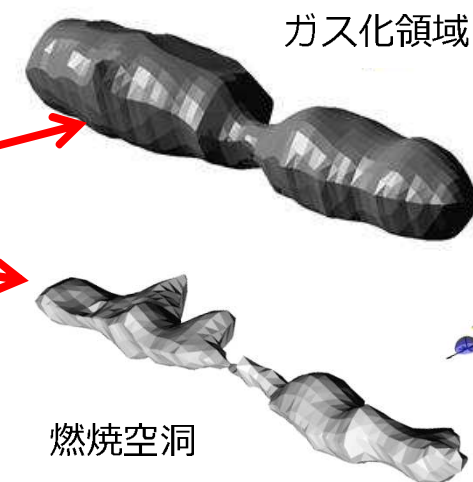
断面14



断面3



実験中の最高温度分布とガス化領域・燃烧空洞形状（横断面図）



3次元形状

これまでの三笠市委託事業で明らかになったこと

□ リンキング方式UCGと同軸方式UCGの違いは？

項目	リンキング方式UCG	垂直同軸方式UCG	水平同軸方式UCG
燃焼/ガス化領域	大 リンキング孔の長さ と直径に依存	小 垂直同軸孔は長さ に限界（水平炭層 では）	大 同軸孔の長さ と直径に依存
生成ガス成分	CO, CH ₄ , CO ₂ , H ₂ など		
生成ガス発熱量	4～12 MJ/m ³	1～7 MJ/m ³	4～12 MJ/m³
反応石炭量	0.8～1.5 kg/h	0.6～0.8 kg/h	1.4 kg/h
生成ガス量	1.3～1.5 m ³ /coal-kg		2.1 m³/coal-kg
生成熱量	11～21 MJ/coal-kg	9～14 MJ/coal-kg	24 MJ/coal-kg
注入酸化剤の 適正酸素濃度	60%以上 高い程生成ガスの 窒素濃度が下がり 発熱量は高くなる	50%程度 高いと注入管が溶断し奥部に酸化剤が 届かない	

□ 燃焼領域・ガス化領域はどのように拡大していくのか？

- ・ 燃焼領域・ガス化領域の拡大は温度・AEの観測で把握可能
- ・ 燃焼領域の温度は1,000℃以上、酸素濃度が高いと1,300℃を超える
- ・ リンキング孔や同軸孔に沿って移動する
- ・ 水平同軸方式は垂直同軸方式に比べ燃焼領域、ガス化領域の拡大が大きい（リンキング方式と同程度）
- ・ 1回の着火で拡大する燃焼領域には限界がある（同軸方式では注入管を定期的に移動させることで継続可能）

□ 消火方法は？

- ・ 酸素供給停止に加え、二酸化炭素を注入することが効果的

□ 実規模のUCGで注意すべき点は？

- ・ 生成ガスに硫化水素が含まれることがある（脱硫装置の必要性）
- ・ 生成ガスの漏洩（地下深部での実施と観測体制の確立により回避）

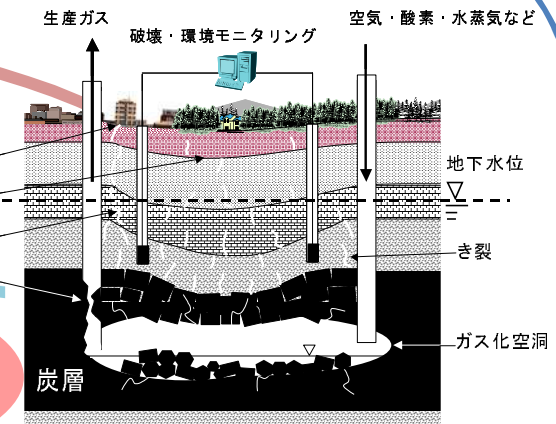
室蘭工業大学環境科学・防災研究センター5か年計画 (2013～)

高度UCGシステム開発 サブプロジェクト

残された課題

- 地盤沈下, ガス漏洩
- 地下水汚染
- 燃焼・ガス化領域の制御
- 効率ガス化炉の形成
- 破壊制御UCGシミュレータ開発

プロジェクト 統括



残された課題

- 地下環境監視・評価
- 大気環境監視・評価
- 生態系環境監視・評価
- CO2排出評価



残された課題

- 生産ガス・熱, 全ての活用
- ガス放出の無い閉路システム
- 各種ガスの効率貯蔵・輸送

生産ガス・熱の高効率 活用サブプロジェクト

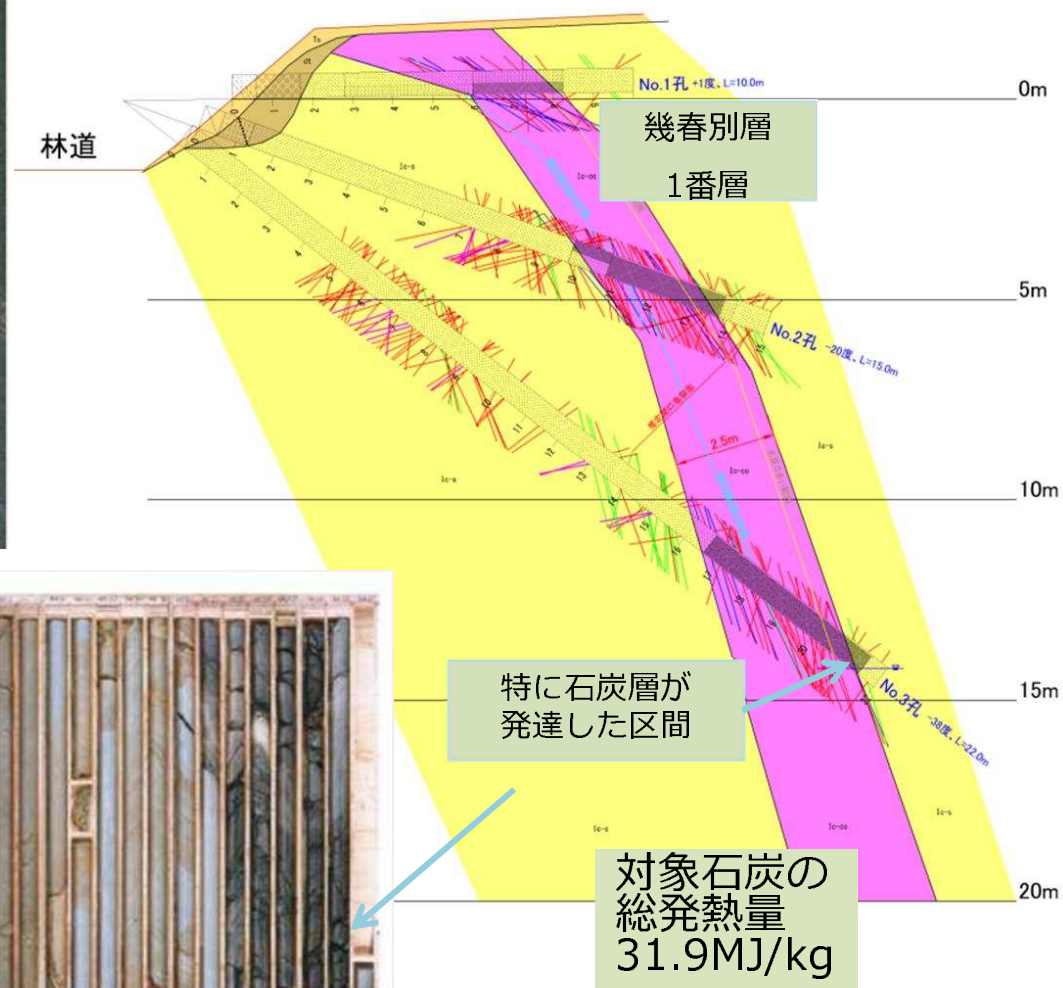
環境監視・評価 サブプロジェクト



高度UCG現場実験（三笠市）



炭層調査ボーリングの結果（平成26年3月）



計測車+データ伝送・閲覧システム

度分布計測
表面温度監視
気・水質分析
その他

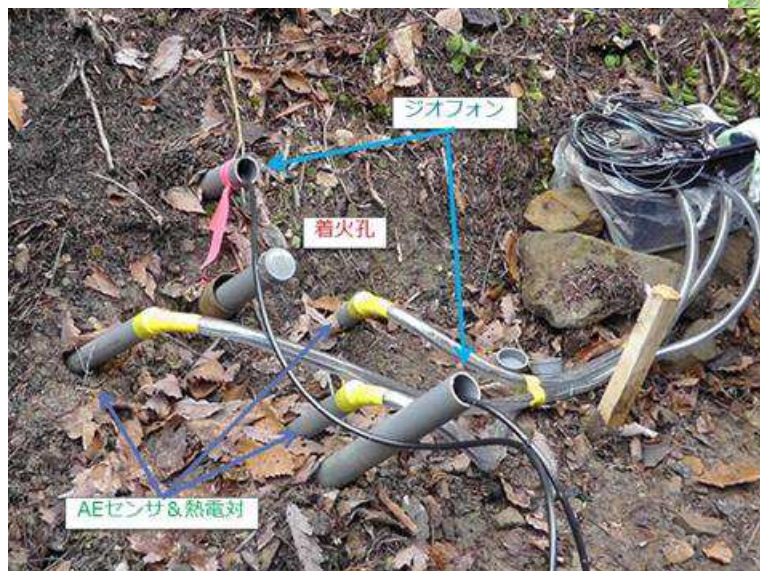


The illustration shows a silver station wagon with a green and white logo on its side. A red antenna is mounted on the roof, emitting three yellow lightning bolts. To the right, a desktop computer system (monitor, tower, and keyboard) is shown, representing the data processing and communication infrastructure.

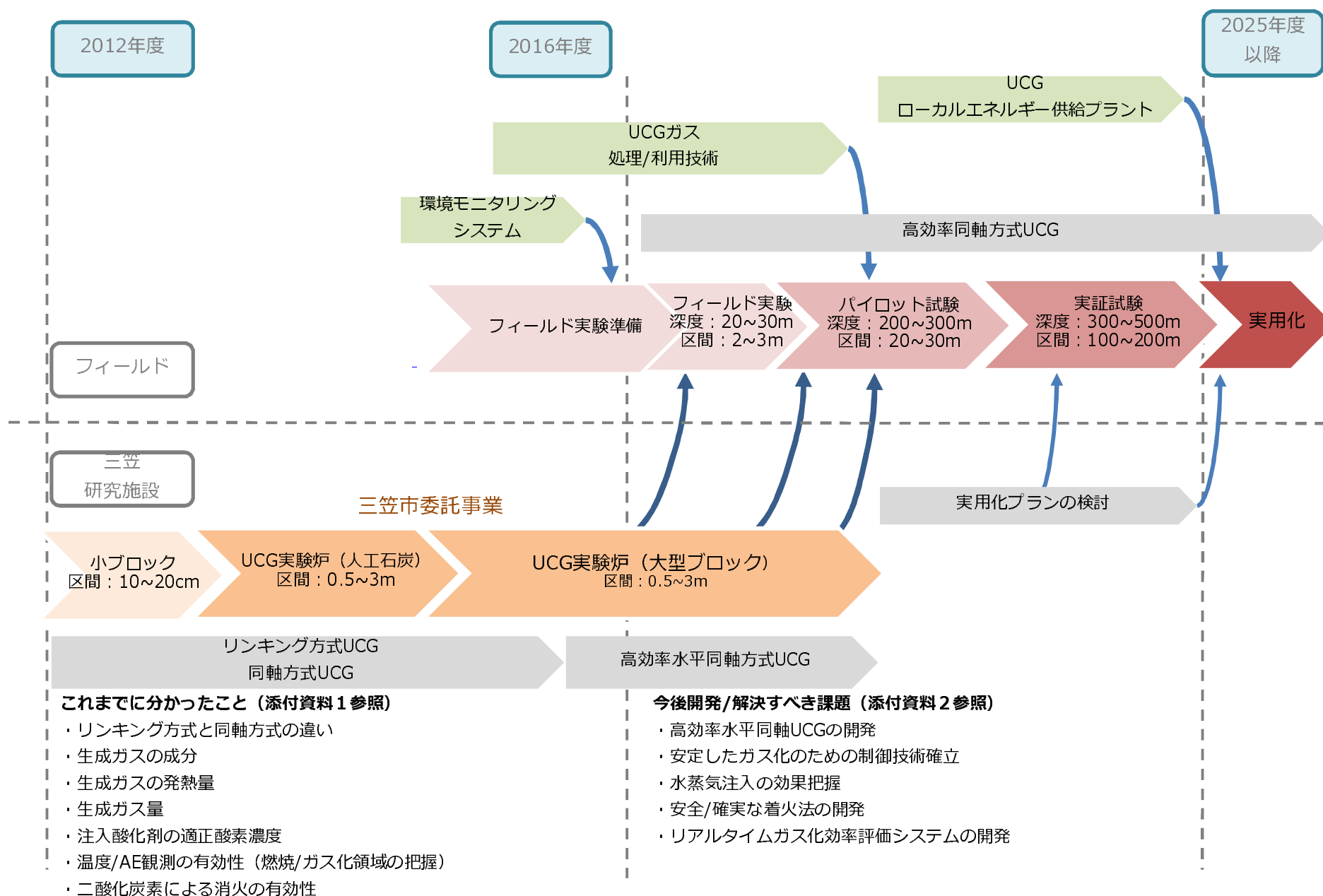
A green house with a red chimney emitting three yellow lightning bolts.

ウェブ上のデータ閲覧画面

現場配置



UCG実用化までのロードマップ（三笠市委託事業の位置づけ）



今後のUCG開発に向けて/解決すべき課題

□ 高効率同軸方式UCGの開発

- ・ より長い燃焼/ガス化経路が確保できる水平同軸孔によるUCG実験を実施し、リンキング方式と同程度の燃焼/ガス化が可能な水平同軸方式UCGの開発
- ・ 孔拡大等物理刺激による燃焼領域拡大技術の開発
- ・ フィールド実験、パイロット試験に向けての課題抽出と解決

□ 安定したガス化のための制御技術確立

- ・ 安定した燃焼/ガス化を持続させる注入酸化剤の注入量/酸素濃度等の制御技術の開発
- ・ 再着火による燃焼/ガス化継続技術の開発
- ・ 目標値：生成ガス量 1.5m³/coal-kg 以上、発熱量5MJ/m³以上、継続時間50時間/m以上
(酸化剤注入量 最大50L/分、酸素濃度50%)

□ 水蒸気注入の効果把握

- ・ 水蒸気注入と生成ガスの水素濃度増加の関係把握

□ 安全/確実な着火法の開発

- ・ 取扱いが簡単で安全、かつ確実な孔底での初期着火方法、及び途中での再着火方法の開発
- ・ 着火剤としての気体燃料（プロパン等）と空気との適切混合比の決定と確実な点火方法の開発

□ リアルタイムガス化効率評価システムの開発

- ・ AE、温度、ガス成分の変化から、リアルタイムで燃焼/ガス化の状況が把握できるガス化効率評価システムの開発
- ・ ガス成分から反応石炭量、生成ガス量等をリアルタイムで算出
- ・ 生成ガスのエネルギーあるいは成分の安定化制御の判断基準を提供