

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360441

研究課題名（和文） 石炭の地下ガス化（UCG）のための燃焼領域評価システムの開発

研究課題名（英文） Evaluation Method for Coal Combustion and Gasification for Underground Coal Gasification (UCG) Technology

研究代表者

板倉 賢一（KEN-ICHI ITAKURA）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20168298

研究成果の概要（和文）：わが国に 300 億トン以上残っている未利用石炭資源の活用方法として、石炭の地下ガス化（UCG）技術がある。しかしながら、従来、諸外国で実践されている手法を、地層構造の複雑なわが国の炭層にそのまま適用はできない。本研究では、地下の炭層内の燃焼・ガス化領域や岩盤の破壊を監視、制御することで、わが国独自の効率的で、安全、環境調和型の UCG 技術を構築できることを、室内基礎実験、小規模現場試験、シミュレータの開発を通して明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Underground Coal Gasification (UCG), a technology to convert more than 30 billion tons of unmined coal of Japan into energy resources, demands the establishment of a safe, high-performance and environmentally friendly UCG technology for application to Japan's coal seams, which have a complex geostructure. This study demonstrated the monitoring and control of fracturing activity around a combustion area in a coal seam and rocks using a series of laboratory experiments, small-scale field tests, and computer simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	12,400,000	3,720,000	16,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：石炭の地下ガス化，UCG，石炭の燃焼領域，アコースティック・エミッション，AE，AE/MS

1. 研究開始当初の背景

近年、再び石炭の地下ガス化（UCG：Underground Coal Gasification）が注目を浴び、各国でプラント建設が進められつつある。古くからある石炭の地下ガス化技術が改めて見直されている理由には、1）炭化水素資源の利用拡大、2）エネルギー資源確保の多

様化の一環、3）エネルギー大国やメジャーによるエネルギー資源の寡占化、4）化石燃料の枯渇問題への対応、5）環境問題への対応（廃棄物（灰など）がない、大気への物質放出がない、SO_x、NO_xの発生が少ない、放射能汚染がない、地表設備の簡略化、CO₂の排出削減など）、6）効率的な UCG 技術の発展などが、

挙げられる。一方、わが国には深部化、薄層、急傾斜等のため保安上の問題を解決できず、また経済的な理由により採掘を取りやめた未利用石炭が300億トン以上あり、この量はわが国の石炭消費量で170年分に相当する。

本研究では、このわが国の未利用石炭に注目した、新たなUCG技術の確立を目指す。わが国の産炭地の多くは地質構造が複雑で、炭層の包蔵メタンガス量も多い。しかも、対象炭層の近くには住民の暮らしがあり、厳しい安全監視、ガス化制御が必要になる。そこで、コンパクトで高効率期待される「リンキング型UCG技術」と「同軸型UCG技術」に着目した。図1(左)は、代表的なリンキング型UCGシステムで、炭層に向けて削孔した二本の坑井を炭層内で連結し、一方の坑井を空気や酸素の注入孔とし、他をガスや熱を採取する生産孔にする方法である。一方、図1(右)に示す同軸型UCGでは、炭層まで降ろした一本の坑井を利用して孔底周辺を燃焼すると共に、二重管構造によりガスを回収する方法である。リンキング距離を短くしたリンキング型UCGや同軸型UCGは、断層や褶曲を介在した複雑な地層構造にも対応が可能であり、回収した炭化水素エネルギーを地域に供給可能になる。また、燃焼領域を監視することによりガス化の制御が可能になるだけでなく、坑井寿命の判断や、その区域の効率的なエネルギー回収、地表へのガスの漏洩、地下水汚染、地盤沈下の評価が可能になる。

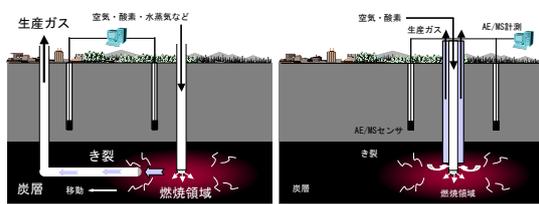


図1 リンキング型(左)と同軸型UCG(右)

本研究で開発を計画しているこれらのUCGシステムは、燃焼領域の監視技術と対をなして完成するシステムであり、諸外国では十分研究されていない技術である。先進国をはじめ、UCGプラント開発を進めている諸外国では、現状の採算を第一優先にするため、条件の良い炭層を対象にした大規模UCGしか行っていない。しかしながら、アジア諸国を始め、条件の悪い炭層からのエネルギー回収が必要になる国や時代が近いうちに訪れるに違いない。わが国の炭層を対象にしたこれらのUCG技術が確立されたなら、わが国のエネルギー資源の確保への寄与と同時に、その技術は諸外国へも移転でき、地球環境の保全にも貢献できる。わが国の炭層を対象にしたUCG技術の確立は、時宜にかなった喫緊の課題と考える。わが国がUCGの分野でイニシアチブを取るためにも、その要素技術である1)炭層

の燃焼による炭層、上下盤破壊のメカニズム解明、2)炭層燃焼の数値シミュレーション手法の確立、3)炭層燃焼に伴う炭層燃焼領域の可視化手法の開発などが必要である。

2. 研究の目的

上述の通り、わが国の石炭層の条件に適用できる、コンパクトで高効率、安全で、低環境負荷型のUCG技術を確立するために、本研究では以下を、研究目的とした。

- (1) 石炭の燃焼に伴う石炭、上下盤の破壊過程およびAE (Acoustic Emission: 破壊音) 発生メカニズムの解明
- (2) 石炭、夾炭層岩石の熱物性の把握
- (3) 上下盤が存在する状況下での AE/MS (Acoustic Emission / Micro-Seismic Activity: 破壊音/微小地震) 計測によるき裂分布の可視化表示
- (4) 炭層、上下盤の破壊を考慮した UCG シミュレータの開発
- (5) 過去に研究例の無い、同軸型 UCG 方式の可能性の検討

以上の目的が達成されたなら、安全で環境に配慮したUCG技術を世界に先駆けて確立できると考える。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために、以下の項目を実行した。

- (1) 石炭、夾炭層岩石の熱物性試験
炭層の燃焼に伴う温度変化に対して、岩石の変形特性、強度、破壊形態等を調べる。この結果は、UCGシミュレータ開発の基礎データになる。
- (2) 石炭、夾炭層岩石のレーザー照射試験
石炭供試体に点熱源としてCO₂レーザー(最大30W)を照射し、AE計測を行う。AE震源位置標定と、酸化帯、還元帯、熱分解帯の関係を検討する。また、この実験の破壊メカニズムをFEM (Finite Element Method: 有限要素法)により確認する。
- (3) 石炭の加熱実験
石炭の板状供試体の底面をヒータにより加熱し、加熱前後におけるき裂分布構造の違いを、マイクロフォーカスX線CTにより定量的に評価する。また、AE計測も行い、き裂の発生時期を評価する。
- (4) 室内UCGモデル実験
石炭ブロックを用いたUCGモデル実験用供試体を用意し、リンキング方式や同軸型UCGの模型実験を行う。計測項目は、石炭内部の温度分布の変化、生産ガスの成分濃度変化やAE等である。この実験を、空気や酸素の流量を変化させて、複数回実施する。
- (5) 小規模UCG現場実験
室内実験の結果を踏まえ、北海道の露天掘採炭にて、小規模UCG現場実験を行う。計測項

目は室内実験と同じである。リンク型と同軸型の UCG 実験を行う。

(6) 回収熱エネルギー評価

室内および現場 UCG 実験の結果から、回収熱エネルギーを評価する。

(7) 破壊を考慮した UCG シミュレータ開発
室内および現場実験結果を基に、格子ボルツマン法を用いた、UCG シミュレータの開発を進める。

(8) UCG の実用化と課題

以上を総合し、リンク型と同軸型 UCG の有効性および実用化の可能性と今後の課題について検討する。

4. 研究成果

研究計画の項目に従って、研究成果を以下に述べる。

(1) 石炭、夾炭層岩石の熱物性試験

石炭・夾炭層岩石の比熱（熱緩和法，光交流法），線膨張係数および熱劣化試験方法を確立し，釧路コールマインの石炭，頁岩，砂岩についてそれぞれの熱物性値を得た。その結果，比熱，線膨張率，共に温度依存性がみられた。比熱は常温から 750[°C]の間では岩種にかかわり無く約 0.3~1.2[J/g・°C]であった。線膨張率は 150[°C]付近までは 1.0×10^{-5} [1/°C]程度，600[°C]付近は $3.5 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-5}$ [1/°C]であった。また，熱履歴を与える事により，質量ならびに弾性波速度が低下することを確認した。これらの結果を，シミュレータ開発の基礎データとした。

(2) 石炭，夾炭層岩石のレーザー照射実験

石炭に対する CO₂ レーザ照射実験（図 2）により，照射スポットの周囲に熔融領域，灰化領域，熱分解領域が形成され，多くの AE は熱分解領域でのき裂発生に起因していることが，電子線マイクロアナライザ分析および AE 計測によりわかった。図 3 は，点熱源周辺の変質領域を表している。ガラス質の熔融領域が形成されると，燃焼が周囲へ拡大しないことがわかった。また，熱分解領域で発生す

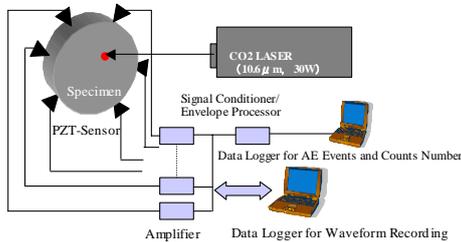


図 2 レーザ照射実験システム

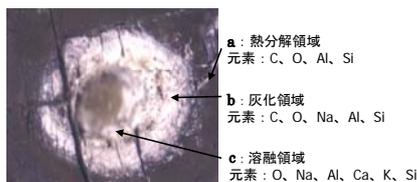


図 3 点熱源による石炭の変質領域

る AE は，FEM による数値シミュレーションから引張応力場での破壊に起因することが確認された。また，夾炭層岩石では，レーザーを照射しても AE は検出されなかった。すなわち，UCG に伴う破壊は炭層内部で卓越すると考えられる。

(3) 石炭の加熱実験

図 4 は，この実験の計測システムである。この実験により熱履歴を受ける前後で，石炭供試体の内部に微小き裂が発生，開口，進展したことを確認した。図 5 に示す 500[°C]の加熱実験では，加熱面から約 15[mm]までの間にき裂が密集していた。その方向は，石炭内の潜在き裂の方向に卓越していた。このき裂発生領域は，石炭の熱分解領域に相当すると推察された。また，加熱時間が長い程微小き裂が発生し，単位時間あたりの温度変化率が高い程，供試体に大きなき裂が発生しやすいことがわかった。すなわちこの結果は，温度の与え方により破壊活動を制御できることを示唆している。

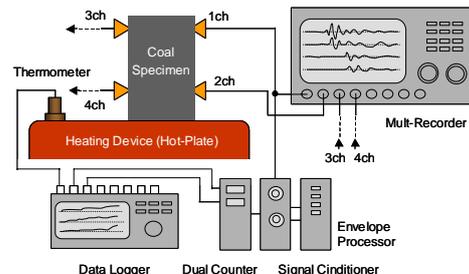


図 4 石炭加熱実験システム

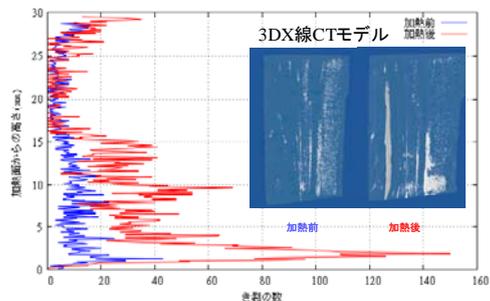


図 5 加熱面からのき裂数分布と加熱前後でのき裂モデルの代表例

(4) 室内 UCG モデル実験

12 個の供試体に対して，様々な条件下で実施した。表 1 に，各実験の条件を示す。以下には，代表例として，表 1 の B4 モデルと B8 モデルの結果を示す。

①石炭ブロックをドラム缶に入れ，石炭の周囲を耐熱セメントで埋めてモデルを作製した。B4 モデルでは，これに V 字型のリンク型孔を設け，交点部分で着火し，2 本とも生産孔とした。酸素を供給し，その際の温度分布計測，AE 計測を行った。図 6 は，この実験の計測システムを表している。

②図 7 は，生産ガスの主な成分濃度変化である。可燃性ガスが，安定して生成された。約

8 時間で、約 5[kg]の石炭が燃焼し、各ガス濃度から求めた平均発熱量は、9.9[MJ/m³]であった。

③熱電対の温度変化から、燃焼領域の移動速度はおおよそ 0.03[m/h]と見積られた。

④図 8 は、モデル断面内の温度分布の変化を表している。燃焼領域が、リンク型に沿って移動しているのがわかる。また、石炭の局所的な破壊により、移動速度および燃焼領域に変化が見られた。

⑤AE イベント数（破壊の数）と温度には正の相関が見られ、AE 震源は燃焼領域と共に移動、拡大した。図 9 は、AE 震源標定の結果で、多くの AE は、石炭ブロック内で発生していた。

⑥石炭ブロックを用いた同軸型 UCG 実験を、2 回行った。当初は内管にステンレスパイプを用いたが、酸素を注入した場合溶断したため、その後セラミックパイプを使用した。

⑦図 10 は、B8 モデルの同軸型 UCG 実験システムである。この実験の石炭の単位体積当たりの発熱量は、リンク型に対して約 20% 低い結果になった。これは、同軸型では燃焼・ガス化領域が十分に拡大しないためであった。このことは、AE 計測結果および試料の切断面の観察により、判明した。また、空気を注入した場合の発熱量の平均は約 1 [MJ/m³]であったが、純酸素を注入した場合は約 7 [MJ/m³]であった。

表 1 UCG モデル実験の条件

No	Molded materials	Type of linking-hole	Burning time, hr	Gasification agents
P1	Coal Block +Concrete	Horizon Bottom	1.0	Air
P2	Drum Can (0.2 m ³)	Horizon Bottom	31.5	Air
D1	Drum Can (0.1 m ³)	Incline Bottom-Top	21.8	Air
B1	Coal Block +Concrete	V-shaped	5.0	Air
B2	Coal Block +Concrete	V-shaped	6.3	Air
B3	Steel Drum (20L)	V-shaped	3.7	Air+Oxygen
B4	Steel Drum (20L)	V-shaped	8.0	Oxygen
B5	Steel Drum (20L)	Coaxial	5.8	Oxygen
B6	Steel Drum (20L)	V-shaped	4.5	Oxygen+Steam
B7	Steel Drum (20L)	Parallel	7.4	Oxygen+Steam
B8	Steel Drum (20L)	Coaxial	5.5	Oxygen
B9	Steel Drum (20L)	L-shaped	7.6	Oxygen+Steam

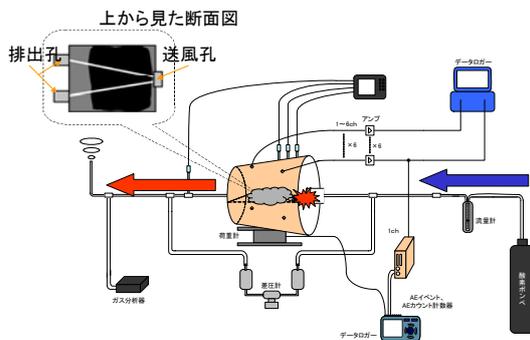


図 6 リンク型 UCG 実験の計測システム

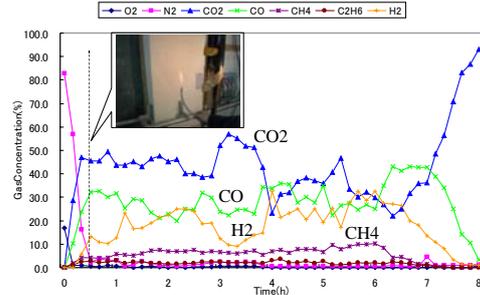


図 7 主なガス成分の濃度変化

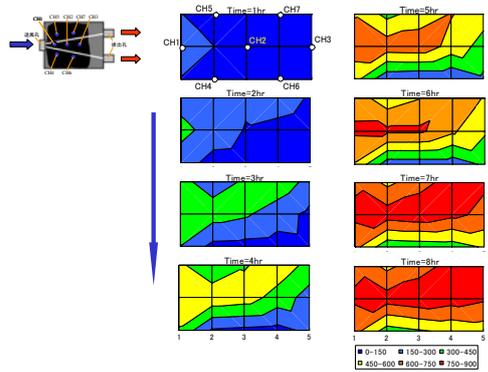


図 8 モデル中央断面内の温度分布変化

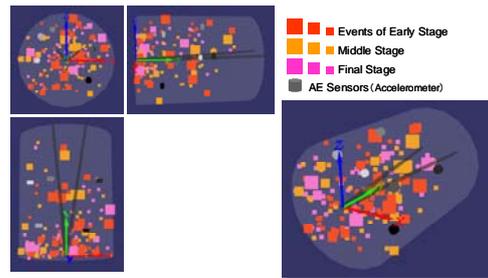


図 9 AE 震源標定結果

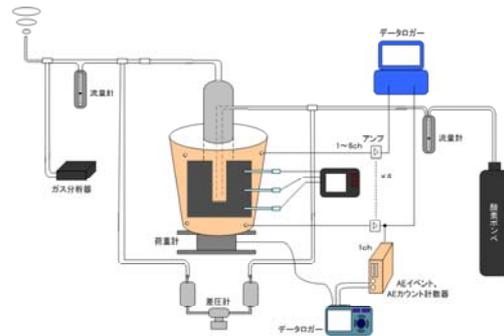


図 10 同軸型 UCG 実験の計測システム

(5) 小規模 UCG 現場実験

炭層傾斜に沿った孔と地表から垂直に削孔した孔を炭層内で連結したリンク型 UCG 実験と、地表から傾斜した炭層に垂直に降ろした孔を用いた同軸型 UCG 実験を実施した。図 11 は、リンク型の UCG 実験の規模と計測システムを表している。実験は、北海道三笠市にある露天掘炭鉱の露頭を用いて行った。いずれの実験でも、地表から酸素を供給した。また、計測項目は、室内実験の場合とほぼ同じである。以下に、それぞれの実験

焼・ガス化のメカニズムでは、石炭の破壊とその集積が鍵であることが明らかになった。図14は、UCGのメカニズムを表している。炭層内の破壊（酸化表面積の拡大）は、燃焼・ガス化領域の連鎖反動的な拡大、すなわちガス化効率に影響を与える。一方、過度に破壊が進行すると、ガス漏洩や地盤沈下、地下水汚染を引き起こす原因になる。このため、破壊の正確な監視、評価と制御がUCGの実用化に向けて不可欠であることが再確認できた。この破壊の監視にはAE/MS計測が有効であり、その解析結果に基づき燃焼・ガス化領域のモデル化、可視化の道筋がたった。また、UCGシミュレータの開発にも着手でき、一定の成果を得た。さらに、同軸型UCGにおいても、リンキング型と同様のガス成分を回収できることがわかった。

一方で、今後解決すべき問題も明らかになった。同軸型の燃焼・ガス化領域の拡大方法や、炭層内に発生するき裂の具体的な制御方法等である。今後は、これらの課題の解決し、複雑な地層構造の炭層にも適用できるコンパクトなUCGシステムを確立して行きたい。

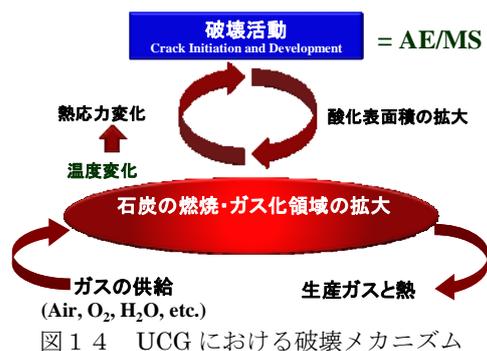


図14 UCGにおける破壊メカニズム

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Zhantao LI, Ken-ichi ITAKURA, An Analytical Drilling Model of Drag Bits for Evaluation Rock Strength, SOILS AND FOUNDATIONS, 査読有, Vol.52, No.2, 2012, pp.216-227, DOI: 10.1016/j.sandf.2012.02.002
- ② Zhantao LI, Ken-ichi ITAKURA, Fundamental Research on Drilling Processes Using Drag Bits, J. of Advanced Materials Research, 査読有, Vols.243-249, 2011, pp.3612-3617, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.3612
- ③ Ken-ichi ITAKURA, Masahiro WAKAMATSU, Masahiro SATO, Tatsuhiko GOTO, Yutaka YOSHIDA, Mitsuhiro OHTA, Koji SHIMADA, Alexey BELOV, Ram GIRI, Fundamental

Experiments for Developing Underground Coal Gasification (UCG) System, Mem. Muroran Inst. Tech., 査読有, 59, 2010, pp.51-54, <http://hdl.handle.net/10258/448>

[学会発表] (計38件)

- ① Ken-ichi ITAKURA, Junki FUKUYAMA, Faqiang SU, Gota DEGUCHI, Kotaro OHGA, Tatsuhiko GOTO, Yutaka YOSHIDA, Laboratory Experiments using AE Monitoring to Evaluate Coal Combustion during UCG, Proc. of 22nd WORLD MINING CONGRESS, Vol.2, pp.599-605, 2011.9.15, Istanbul
- ② Ken-ichi ITAKURA, Masahiro WAKAMATSU, Masahiro SATO, Tatsuhiko GOTO, Yutaka YOSHIDA, Mitsuhiro OHTA, Koji SHIMADA, Alexey BELOV, Ram GIRI, Evaluation of Coal Seam Combustion using AE/MS Techniques for Underground Coal Gasification (UCG), Proc. of 2009 Korea-Japan Joint Symposium of Rock Engineering, pp.335-340, 2009.10.22, Suwon

[その他]

招待講演 (計7件)

- ① 板倉賢一, 北海道の石炭技術と石炭資源の活用—これからは石炭の時代である—, 「石炭セミナー in 釧路」, 釧路市主催, 釧路プリンスホテル, 2011.7.19
- ② 板倉賢一, 北海道のクリーンな石炭有効活用について—石炭地下ガス化とは—, 三笠市開庁130年記念事業「石炭エネルギーシンポジウム in 三笠」, 三笠市主催, 三笠市民ホール, 2011.10.22

報道関連 (計16件)

- ① 石炭ガスにして採取, 読売新聞, 道総合, 2011.10.19
- ② 生かせ「眠れる資源」室蘭工大 石炭, 地下で燃焼実験, 毎日新聞, 2011.11.30

6. 研究組織

(1) 研究代表者

板倉 賢一 (KEN-ICHI ITAKURA)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20168298

(2) 研究分担者

吉田 豊 (YUTAKA YOSHIDA)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20002933
後藤 龍彦 (TATSUHIKO GOTO)
室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50125374