

平成29年3月30日
於 三笠市民会館

消火実験の成果

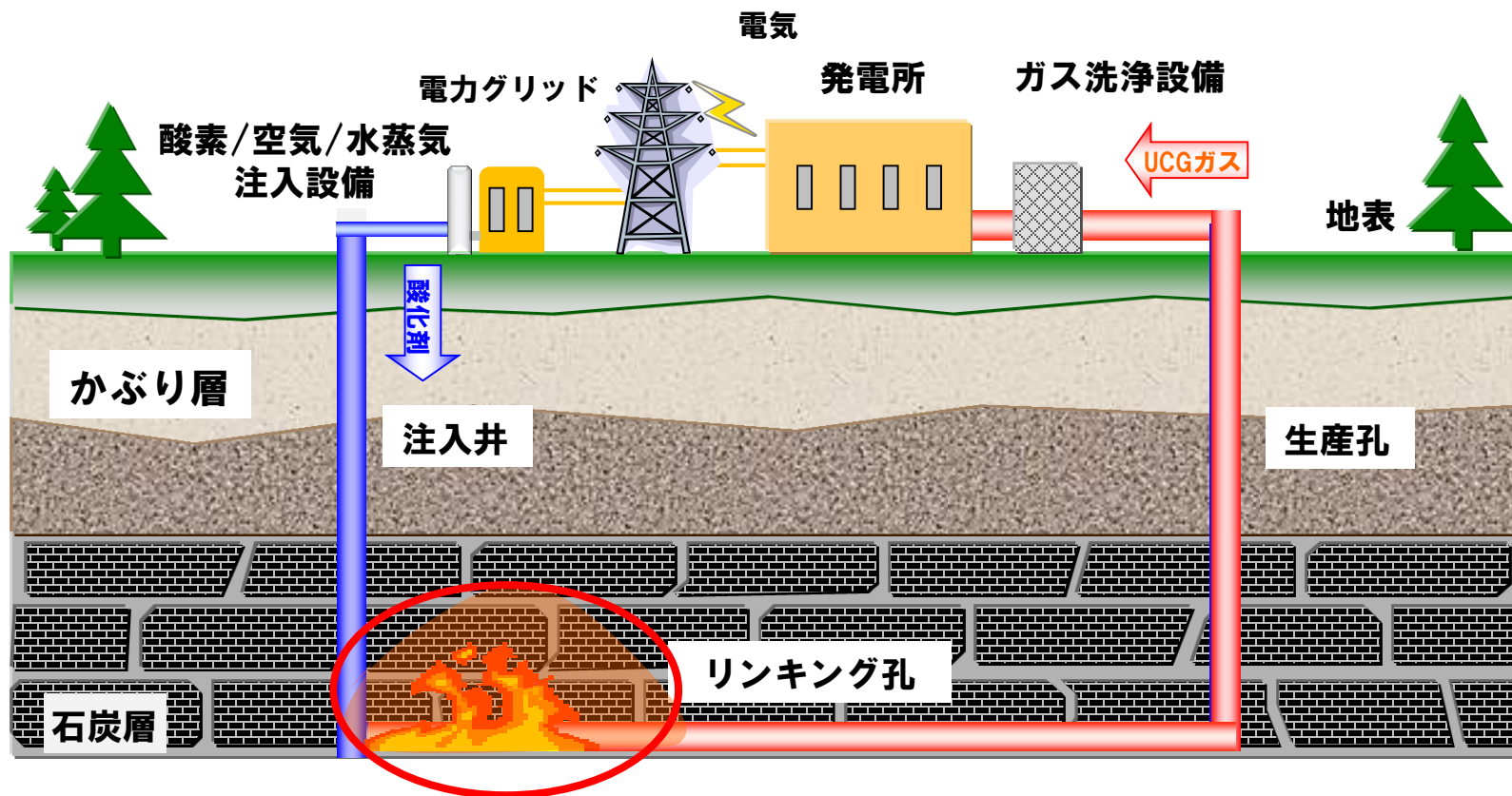
～安全なUCGシステムを目指して～

九州大学大学院工学研究院
地球資源システム工学部門
助教 濱中晃弘



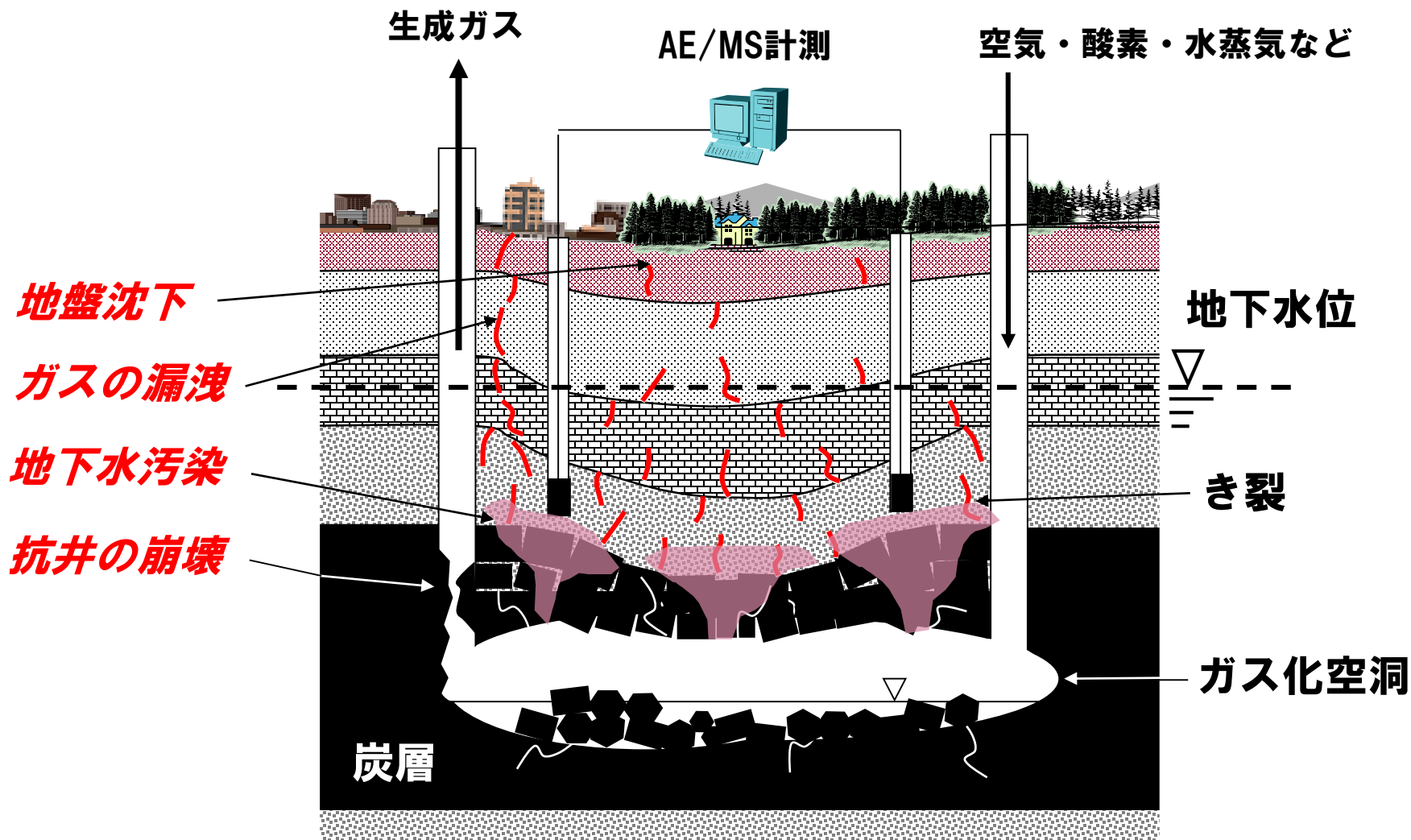
九州大学

石炭地下ガス化 (Underground Coal Gasification: UCG)



炭層温度が1,000℃以上！！

UCGプロセスに伴う環境への影響



環境被害の例（アメリカ：Hoe Creek）



ガス漏れ



地表陥没

水質データ

Chemical constituent	Before burn (mg/l)	After burn (mg/l)
Ca	20	200
Mg	5	15
Na	100	300
HCO ₃ ⁻	300	500
SO ₄ ²⁻	4	1150
H ₂ S	0.02	0.4
Cl ⁻	30	40
NH ₃	1	100
TDS	350	2300
Phenols	0.1	20
TOC	20	200
CH ₄	0.42	0.16

(From Humenick and Mattox, 1978)

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。

研究目的

- ✓ UCGプロセス中、炭層温度は1,000°Cを超える。
- ✓ ガス化空洞、き裂の発生などに伴い、周辺環境への影響が懸念される。



地下モニタリングの
必要性

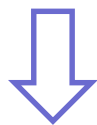
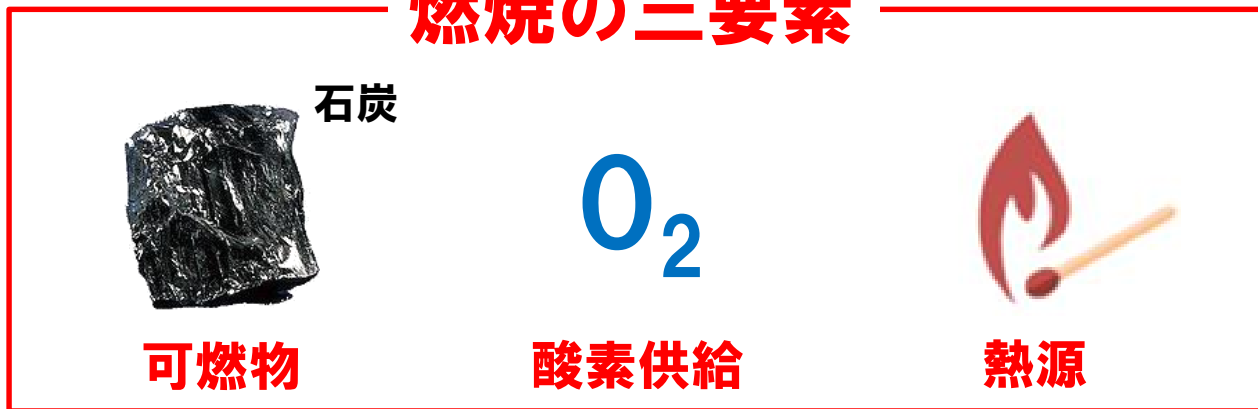


迅速な消火方法の
確立が必要

地下の石炭層のガス化に伴う環境リスク拡大を抑制するための迅速な炭層の消火方法に関して検討する。

燃焼および消火の概念

燃焼の三要素



除去できない

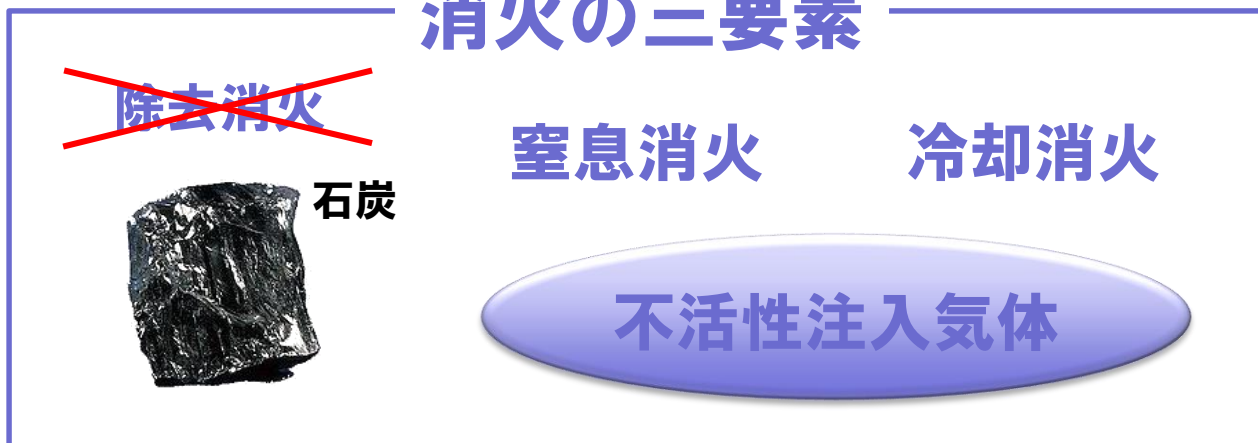


供給停止

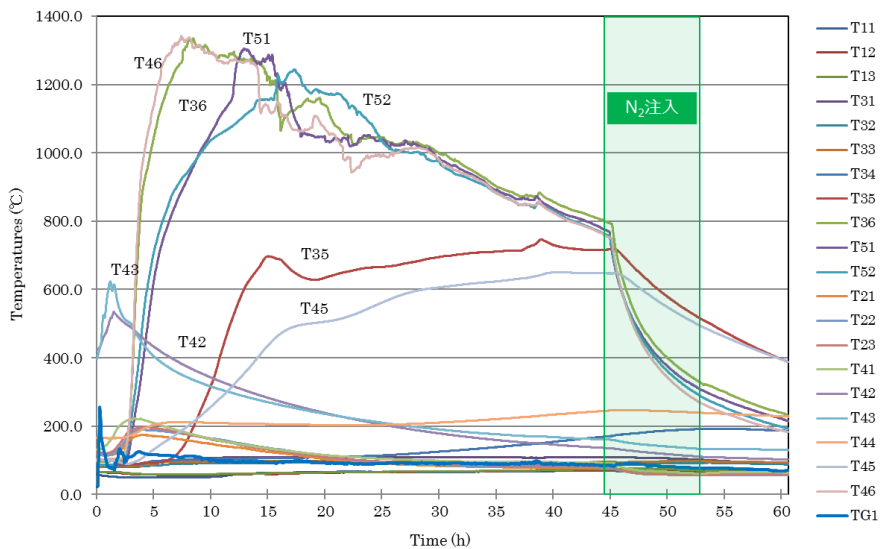


温度低下

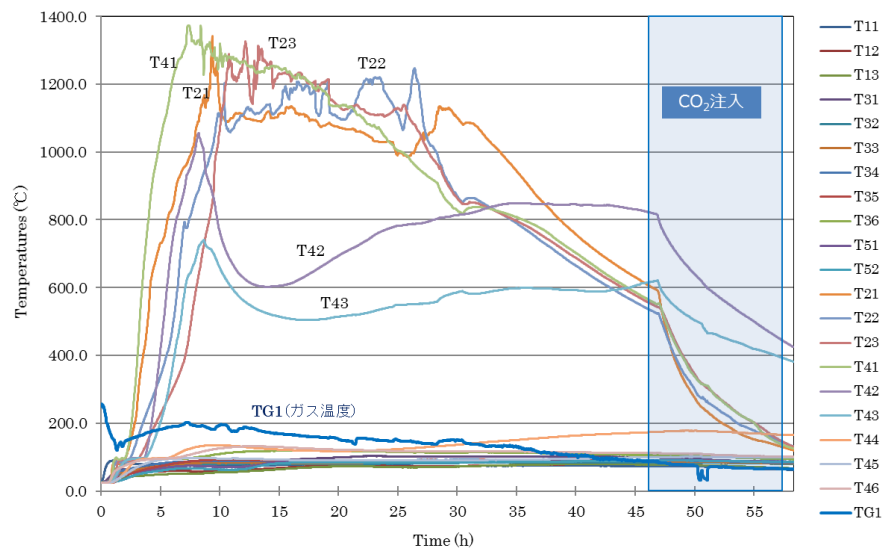
消火の三要素



過去のUCG模型実験における消火の結果



(a) 窒素注入による消火

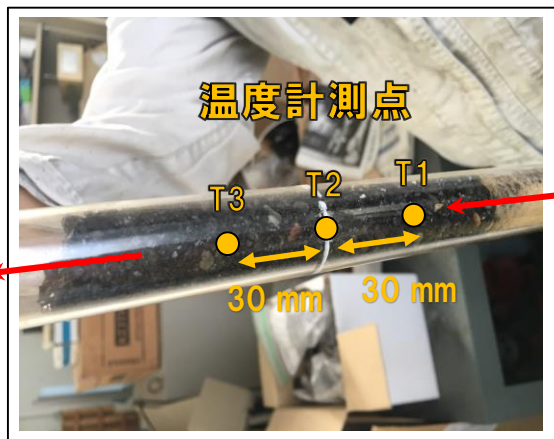


(b) 二酸化炭素注入による消火

UCG模型実験中の炭層温度計測結果

不活性気体注入（窒素、二酸化炭素）による窒息消火および冷却消火に着目した消火方法に関して検討する。

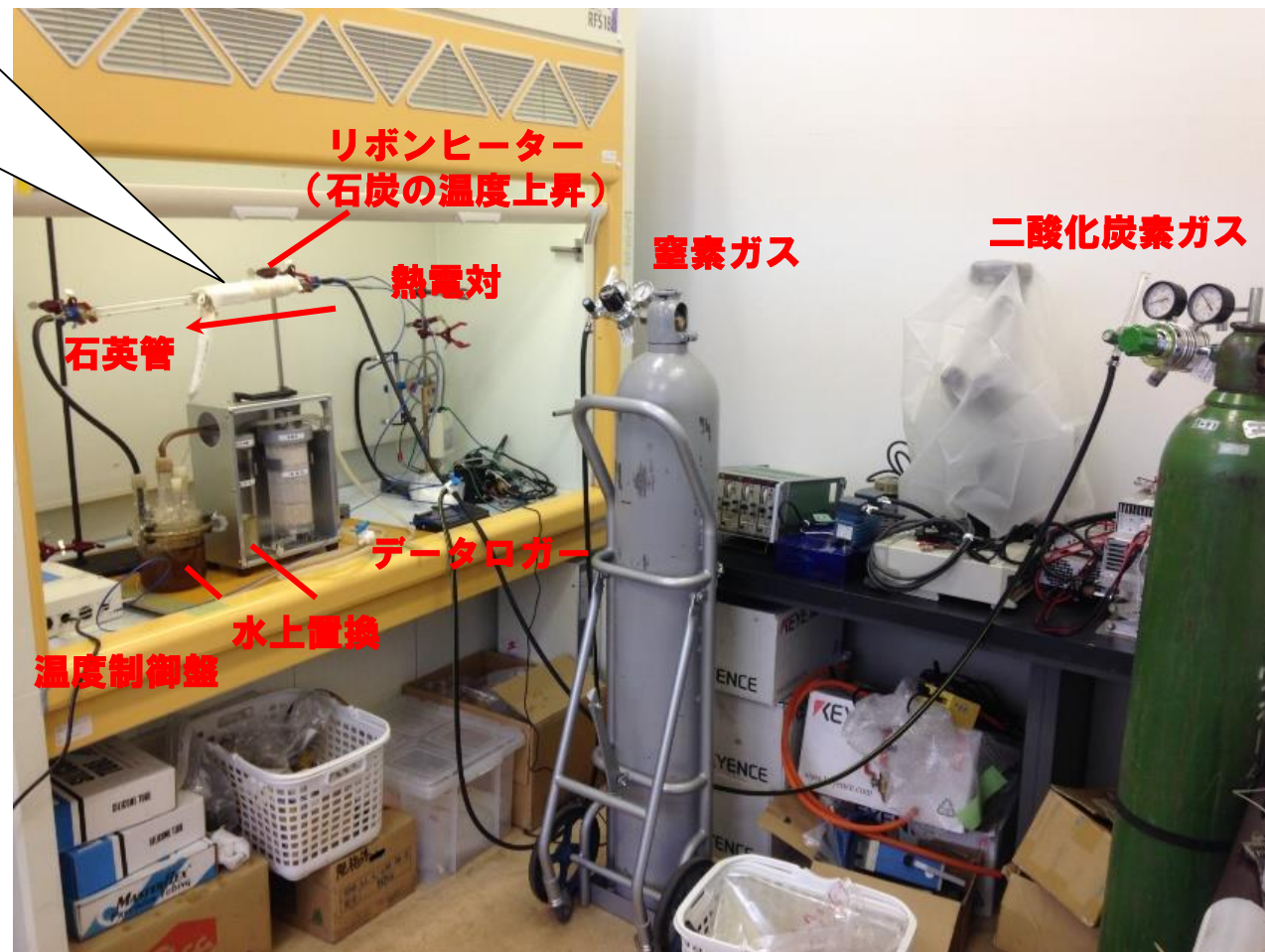
実験方法



粒径1~4 mmの石炭
小塊25 gを使用

1. 窒素を注入しながらリボンヒーターに電流を流し、石炭の温度を700℃まで昇温させる。
2. 石炭の温度が700℃で定常状態に達した後、リボンヒーターへ流す電流を止めると同時に20℃の不活性気体（窒素、二酸化炭素）を注入し、石炭の温度低下を計測する。

注入ガス



リボンヒーター
(石炭の温度上昇)

熱電対

石英管

窒素ガス

二酸化炭素ガス

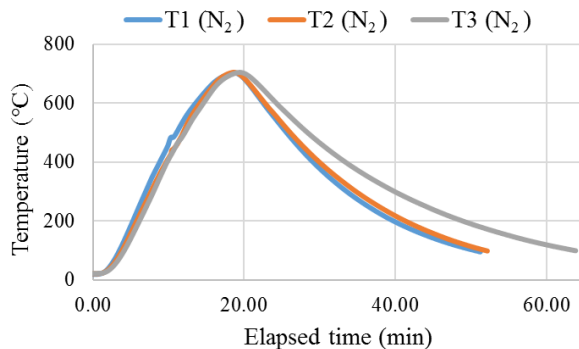
データロガー

水上置換

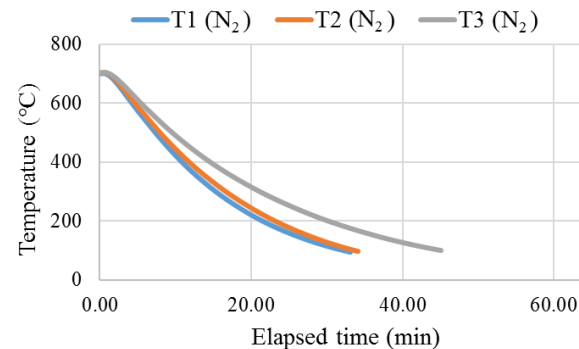
温度制御盤

実験結果

石炭温度計測結果（全体）

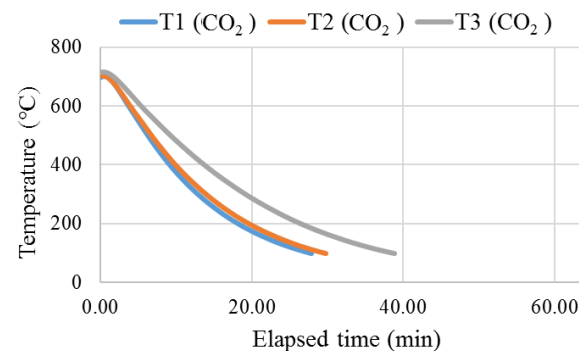
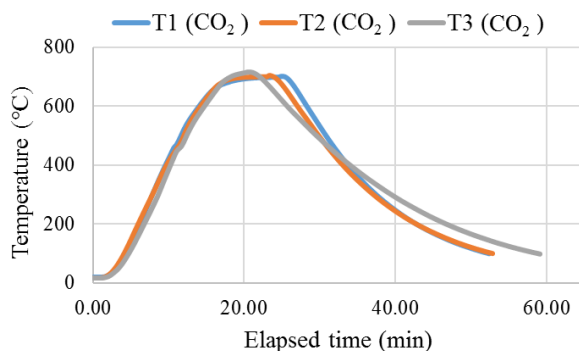


石炭温度計測結果（消火時）



窒素注入
(1 L/min)

二酸化炭素注入
(1 L/min)



注入口に近い部分の石炭から温度低下しており、ガスの流れに沿って石炭温度が低下している。

二酸化炭素注入の方が石炭の温度低下が速い。

考察

※新編 熱物性ハンドブック参照

窒素ガス	
気体温度 (°C)	モル比熱 (J/mol・K)
700	30.74
600	30.10
500	29.57
400	29.26
300	29.15
200	29.20

二酸化炭素ガス	
気体温度 (°C)	モル比熱 (J/mol・K)
700	51.44
600	47.35
500	44.68
400	41.43
300	37.51
200	34.35



石炭温度 (°C)	窒素注入	二酸化炭素注入
	温度低下速度 (°C/min)	温度低下速度 (°C/min)
700-600	30.63	36.78
600-500	29.88	35.54
500-400	25.96	31.52
400-300	20.59	24.67
300-200	15.28	17.65
200-100	9.41	9.96



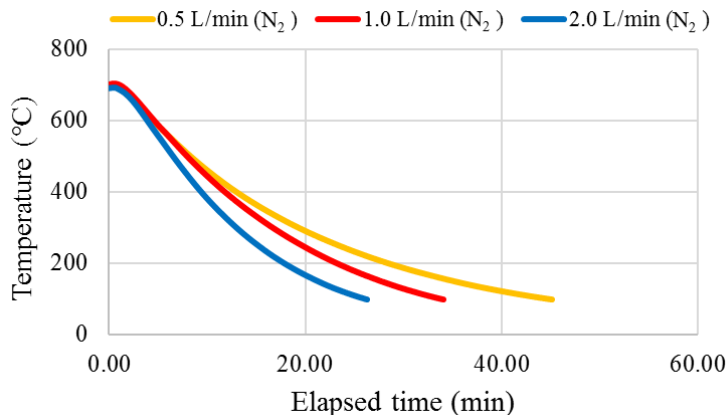
二酸化炭素の方が気体のモル比熱が大きい。



石炭から多くの熱を奪ったため、温度低下速度が増大した。

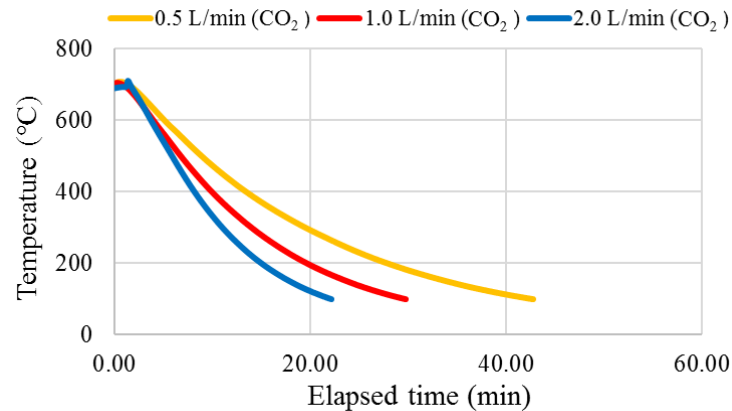
注入流量の影響

窒素注入



石炭温度 (°C)	温度低下速度 (°C/min)		
	0.5 L/min	1.0 L/min	2.0 L/min
700-600	27.58	30.63	38.00
600-500	26.02	29.88	38.10
500-400	21.42	25.96	34.74
400-300	15.88	20.59	27.93
300-200	10.92	15.28	20.49
200-100	6.13	9.41	12.02

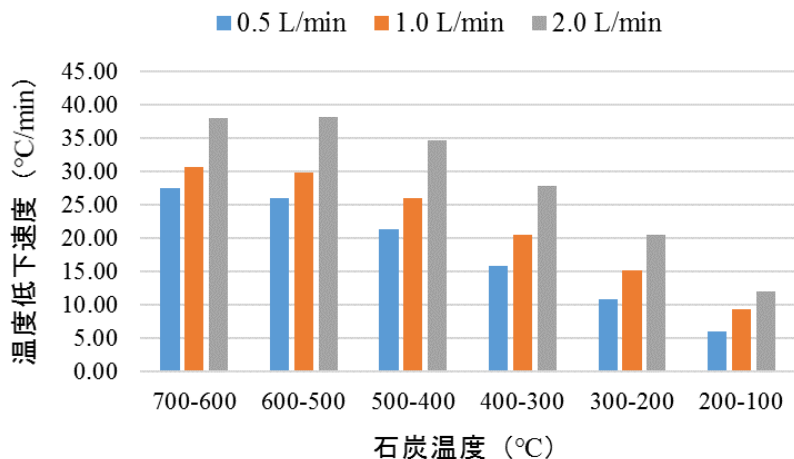
二酸化炭素注入



石炭温度 (°C)	温度低下速度 (°C/min)		
	0.5 L/min	1.0 L/min	2.0 L/min
700-600	29.24	36.78	46.83
600-500	26.33	35.54	46.31
500-400	29.19	31.52	43.62
400-300	16.52	24.67	35.08
300-200	11.93	17.65	25.00
200-100	6.76	9.96	14.09

窒素注入

石炭温度 (°C)	温度低下速度 (°C/min)		
	0.5 L/min	1.0 L/min	2.0 L/min
700-600	27.58	30.63	38.00
600-500	26.02	29.88	38.10
500-400	21.42	25.96	34.74
400-300	15.88	20.59	27.93
300-200	10.92	15.28	20.49
200-100	6.13	9.41	12.02



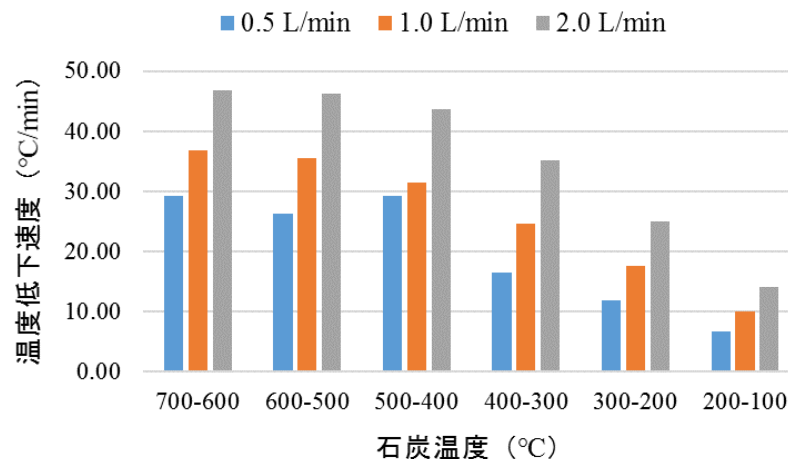
注入流量を2倍



**温度低下速度が20~30%増大する。
(消火時間が20~30% 短縮される。)**

二酸化炭素注入

石炭温度 (°C)	温度低下速度 (°C/min)		
	0.5 L/min	1.0 L/min	2.0 L/min
700-600	29.24	36.78	46.83
600-500	26.33	35.54	46.31
500-400	29.19	31.52	43.62
400-300	16.52	24.67	35.08
300-200	11.93	17.65	25.00
200-100	6.76	9.96	14.09

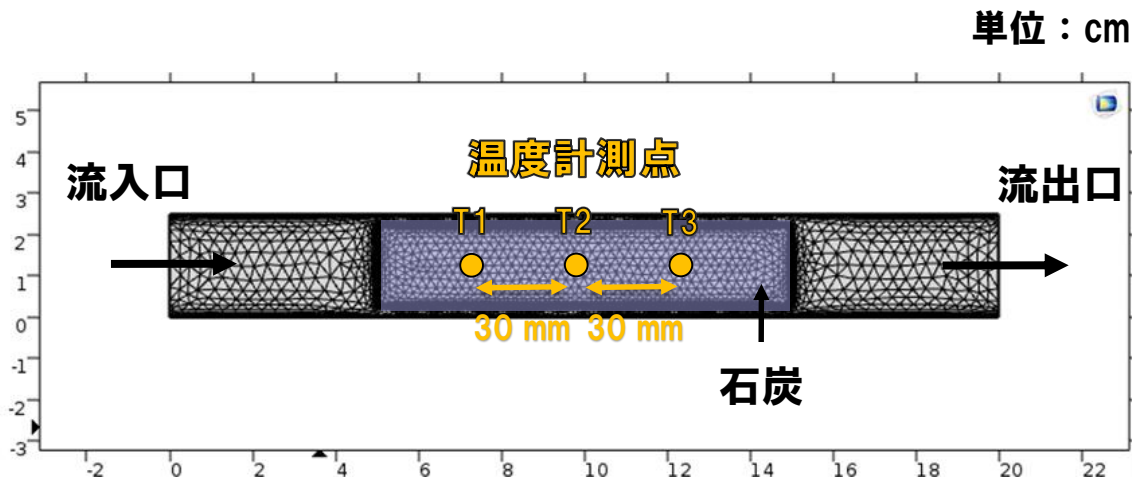


注入流量を2倍

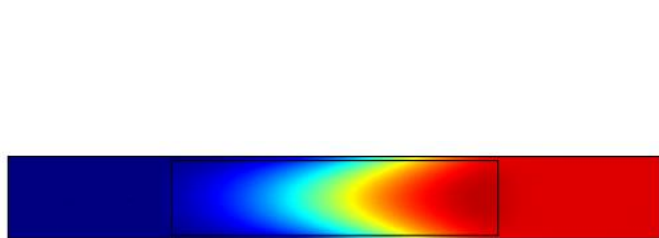


**温度低下速度が30~40%増大する。
(消火時間が30~40% 短縮される。)**

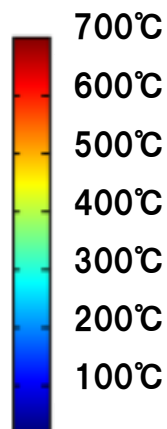
数値解析モデルの作成



入力物性値	
石炭の初期温度	700°C
注入流量	1 L/min
石炭の間隙率	0.4
石炭の熱伝導率	0.2 W/(m・K)
石炭の定圧比熱	0.87 J/(g・K)
石炭の密度	1.15 g/cm ³
石炭の浸透率	1.0 e ⁻¹⁴ m ²



窒素注入

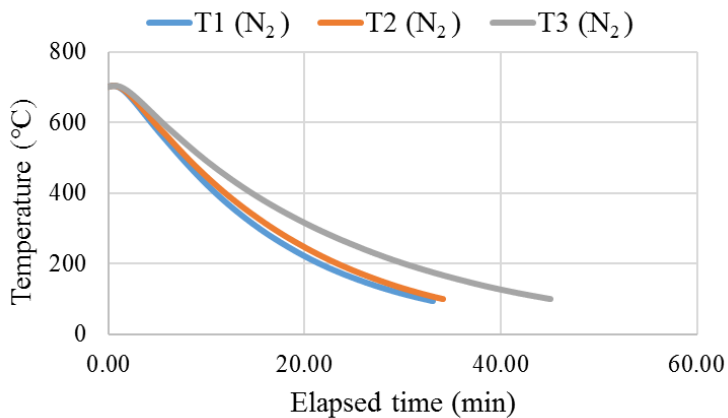


二酸化炭素注入

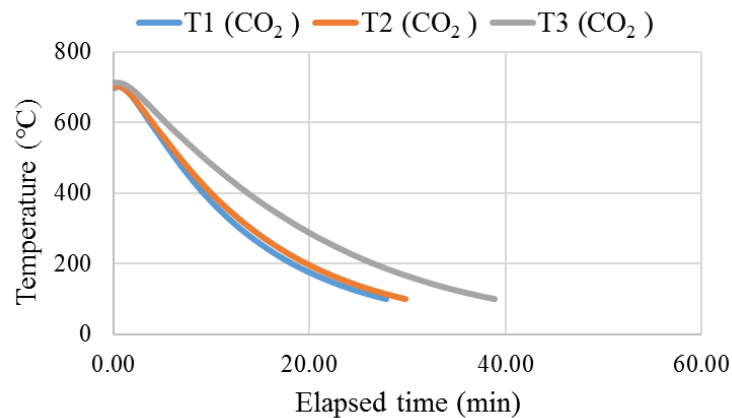
実験結果および解析結果の比較

実験結果

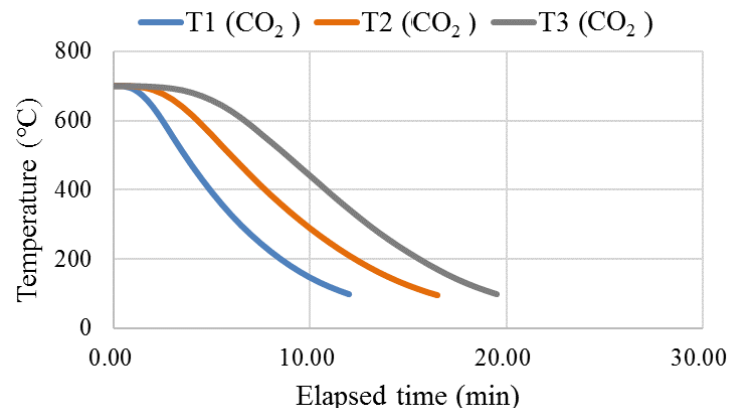
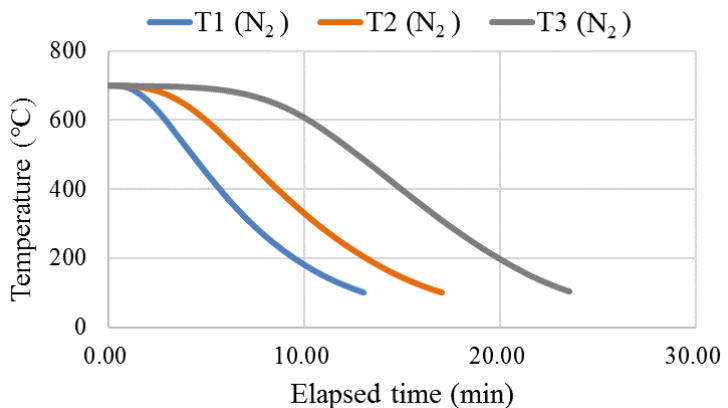
窒素注入 (1 L/min)



二酸化炭素注入 (1 L/min)



解析結果



まとめ

- 石炭の消火では、注入ガスの流れに沿って炭層の温度が低下する。
- 消火時の注入ガスとして、モル比熱の大きな二酸化炭素を注入することにより、炭層の温度低下速度を向上させることが可能である。
- 消火時の注入量を2倍に増大させることで、窒素注入の場合は20～30%、二酸化炭素注入の場合は30～40%消火時間を短縮することが可能である。
- 室内実験データを基に数値モデルを作成することができれば、実際のオペレーション時においても消火時間の予測および効率的な消火条件の検討が可能になる。