

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026

プログラムNo. B2-2-13

石炭の低温反応機構解明とそれに基づく 自然発熱抑制技術開発

カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発
/石炭利用環境対策事業/石炭利用環境対策推進事業

発表：2026年7月22日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 窪田 征弘 / 山口 哲正

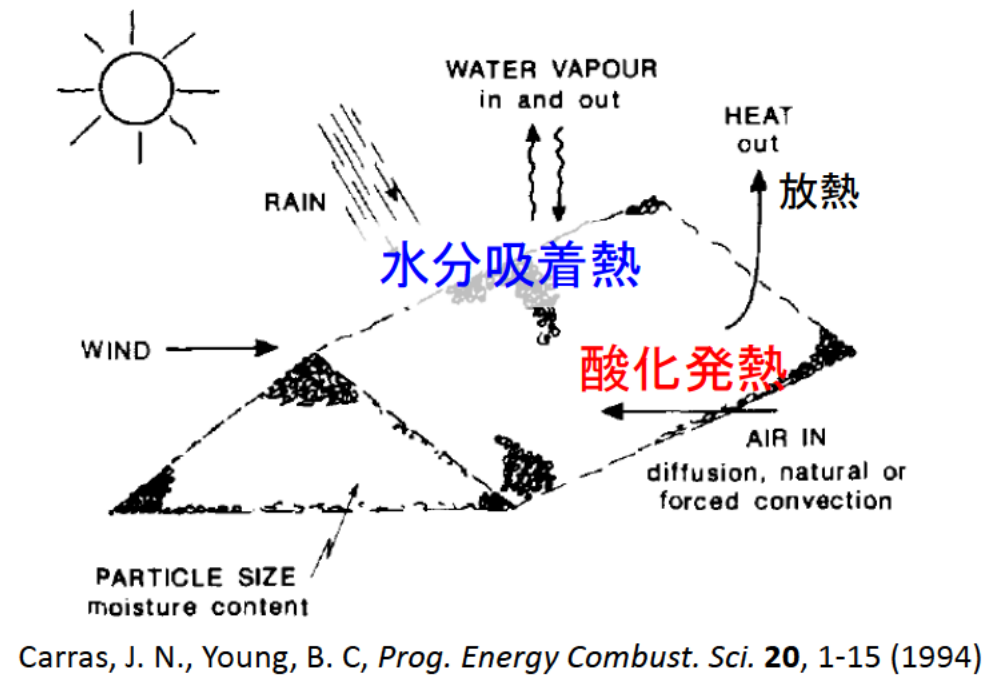
*団体名 日本製鉄（株） / （一財）電力中央研究所 / （国）九州大学

問い合わせ先 日本製鉄（株） 窪田征弘 E-mail: kubota.q58.yukihiro@jp.nipponsteel.com

TEL: 070-3914-4707

背景、目的

- 日本の電力会社等は燃料調達コストの低減やエネルギーセキュリティ強化のために低品位炭の利用拡大
- 鉄鋼業界でも、低品位炭の使用比率が約10 → 50%へ増加
- 再エネの有望な原料となるバイオマスでも貯蔵中の発火事例有り



自然発熱に起因するリスクが増加

低品位炭の活用、バイオマス活用に向けて
自然発熱抑制、自然発火防止が重要

GOAL

自然発熱機構に基づいた発熱抑制技術を確立し、社会実装する

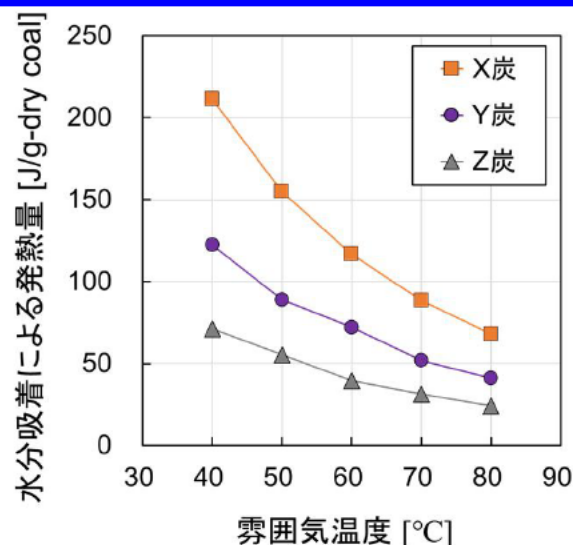
石炭の自然発熱現象（概念図）

石炭：気乾状態 (air dry)

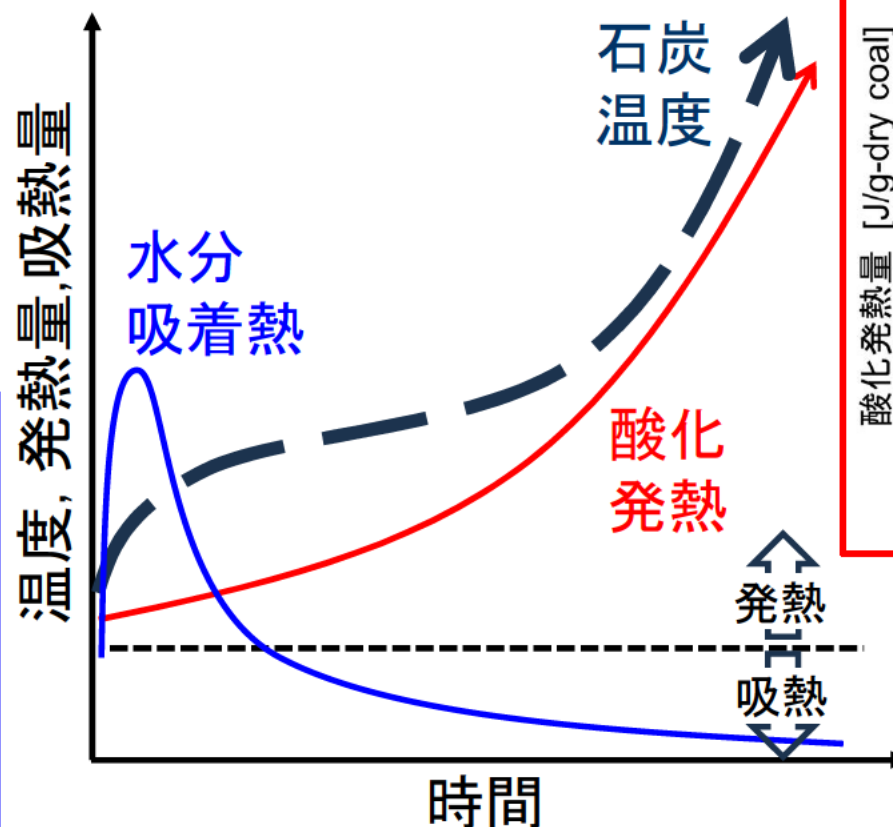
雰囲気：湿潤 (wet)

	Ash	VM	
	dry%	dry%	d.a.f.%
X炭	2.0	49.7	50.7
Y炭	7.0	41.5	44.3
Z炭	13.9	31.7	36.0

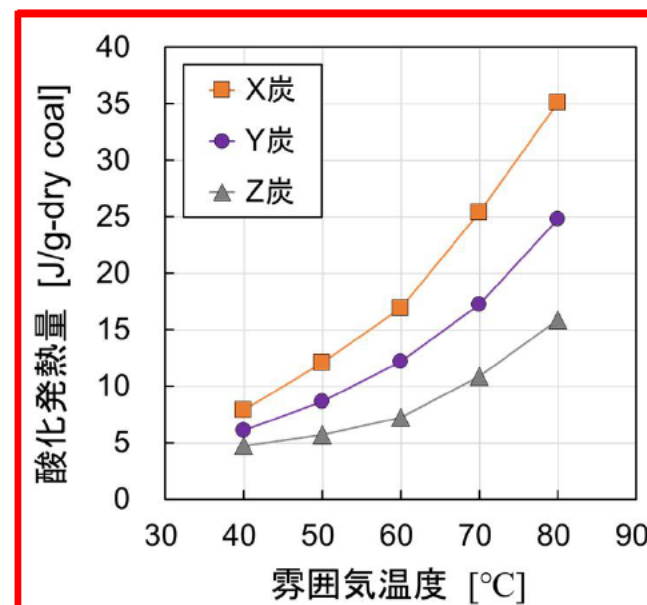
水分吸着熱



本プロジェクト結果
高精度TG-DSC



酸化発熱



本プロジェクト結果
高精度TG-DSC

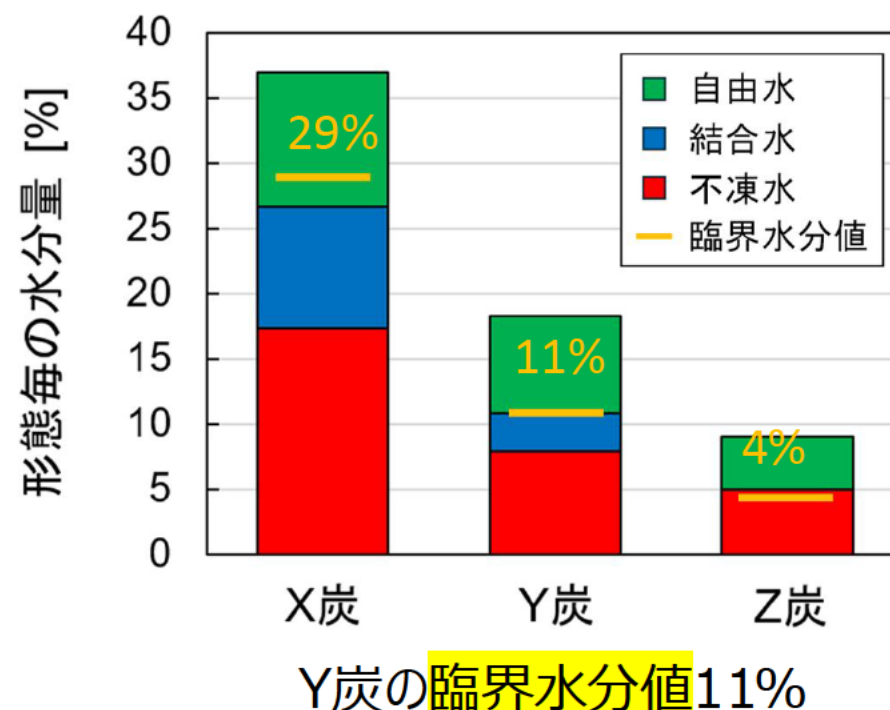
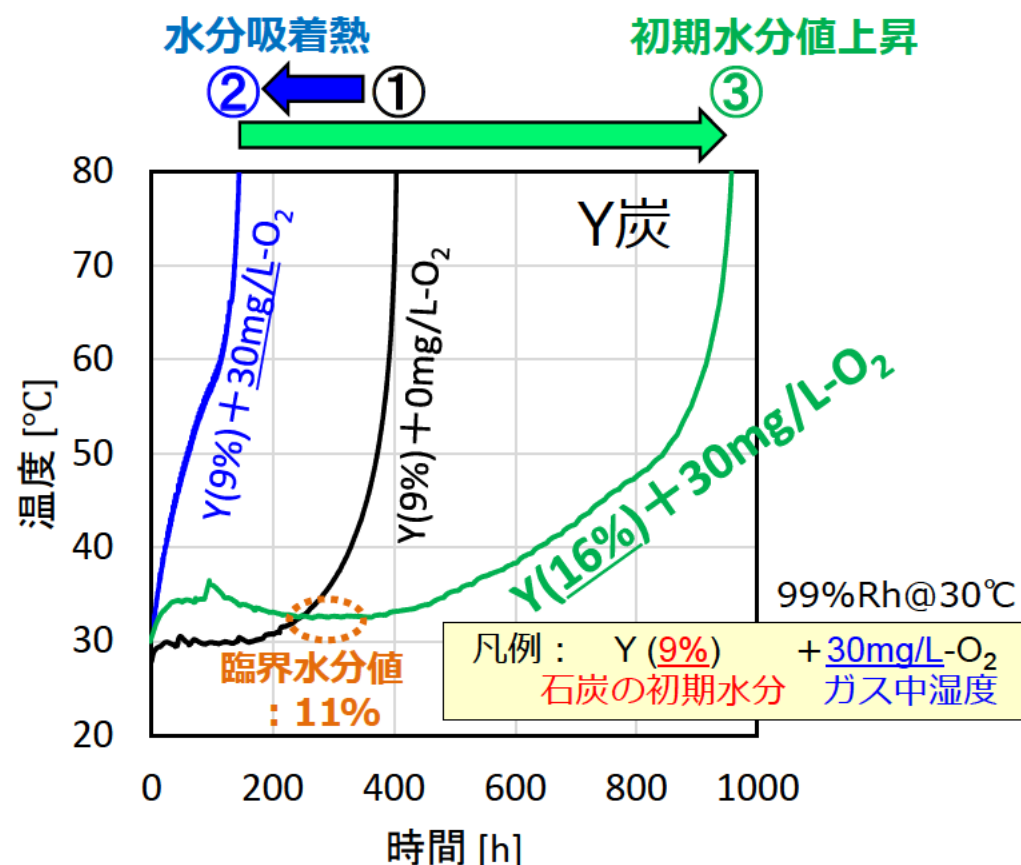
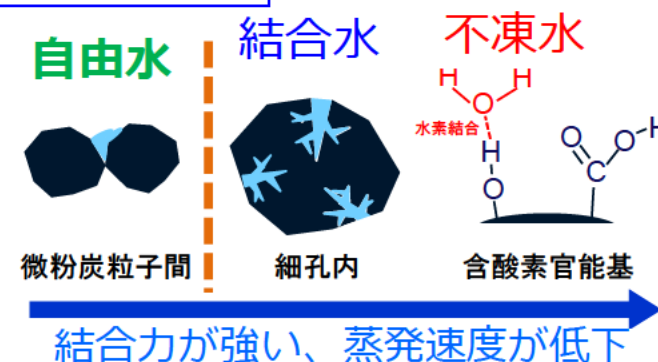
石炭の自然発熱の要因は、水分吸着熱と酸化発熱。
ヤード貯炭中の低温域(20°C~40°C)では、水分吸着熱の寄与が大きく、自然発熱の起点となりうる。
その後の昇温過程では、酸化発熱の寄与が大きくなる。

水分管理による昇温抑制

石炭の初期水分値を**臨界水分値** (Y炭11%)超で管理することで、
水分吸着熱の抑制、および
結合力の弱い自由水の脱着熱による昇温抑制が可能

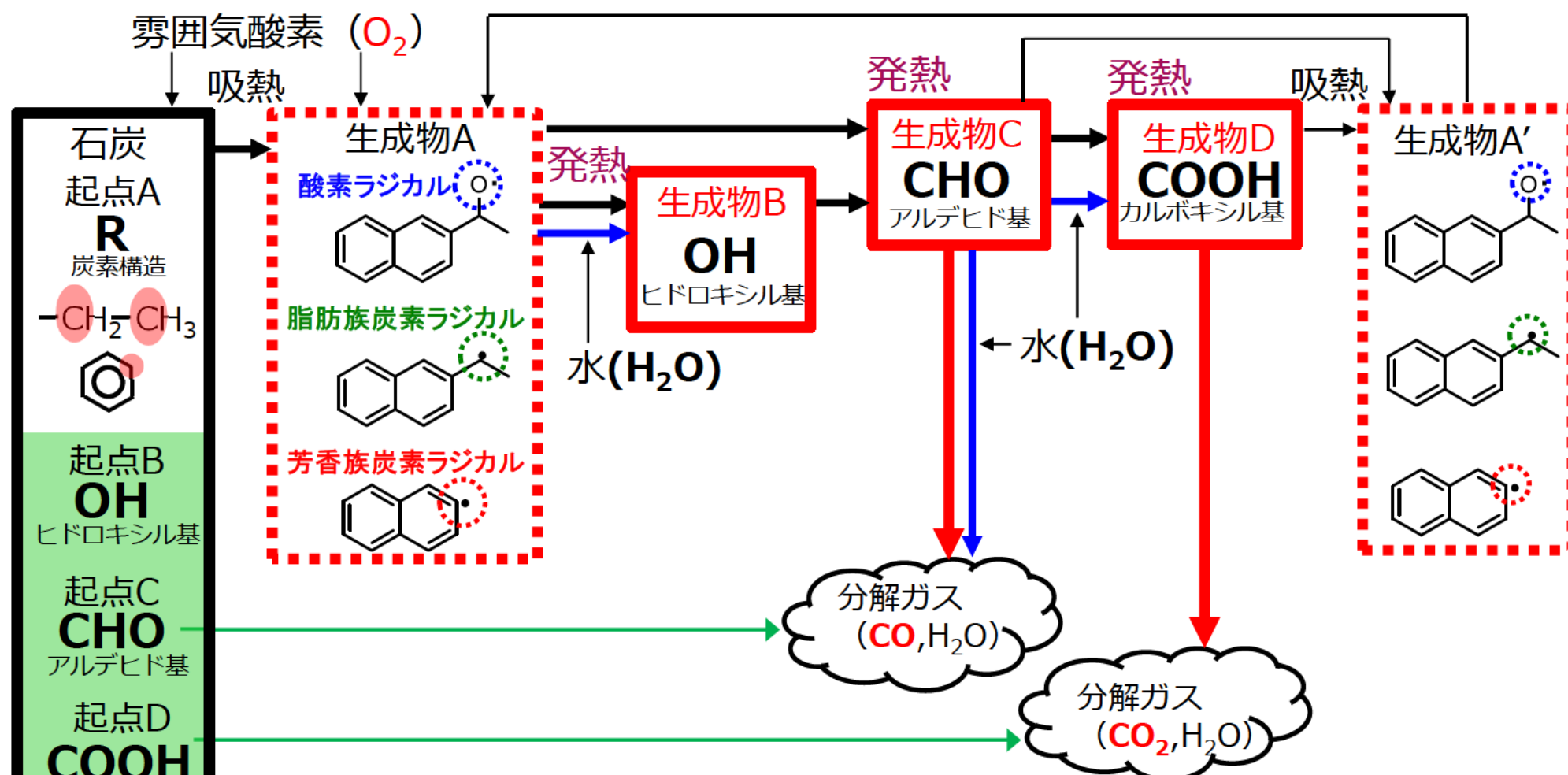
○DSC：水分形態解析と
 臨界水分値の関係把握

石炭中水分形態



石炭の低温酸化機構

ONMR, ESR, 酸素同位体を用いたガス分析にて解析



雰囲気酸素により、石炭中の水素が引き抜かれてラジカルが生成。ラジカルに雰囲気酸素が付加され、含酸素官能基が生成し、生成物B→C→Dへと酸化が進行する（発熱反応）。

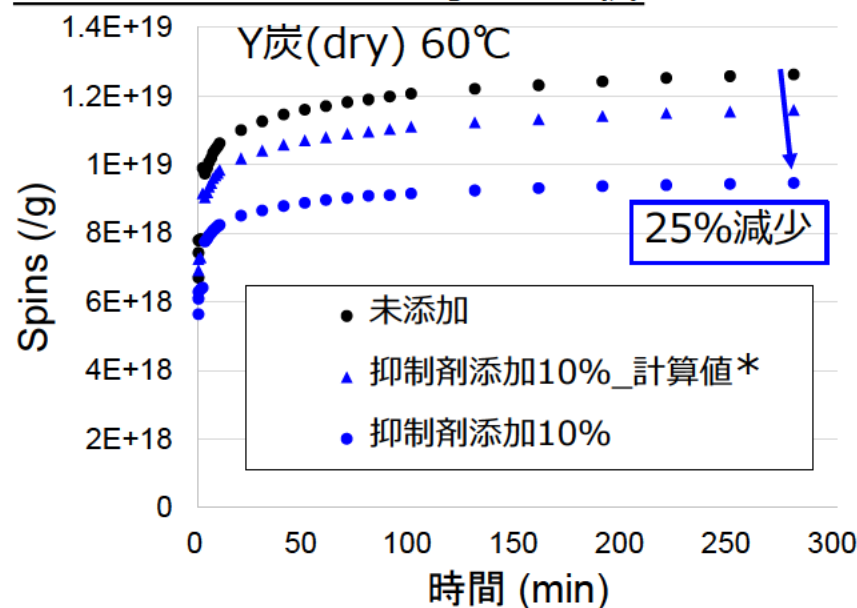
含酸素官能基の分解により、CO, CO₂ガスが生成すると同時に、新たなラジカルが再生成され、サイクリックな酸化反応が持続的に進行する。

発熱抑制剤による酸化発熱抑制

発熱抑制剤の検討

- ラジカル生成抑制や反応を停止できる、安価で大量使用可能な薬剤を探索
- 自工場で副生し、利用可能な発熱抑制剤として着目
- 日本製鉄 室蘭コークス工場では、コークス炉装入炭に「**タール滓**」を添加 ⇒ 発熱トラブル実績無し

ESRラジカル生成挙動解析

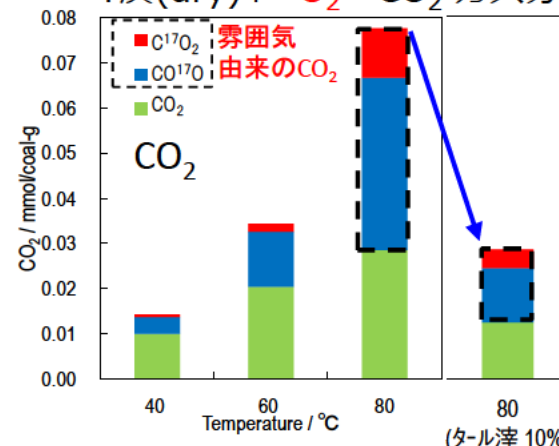


*石炭単独と抑制剤単独のラジカル量から算出した両者を混合した際の加重平均値

タール滓を添加することによって、60°Cの低温酸化条件下でY炭に生成するラジカル量は約25%減少

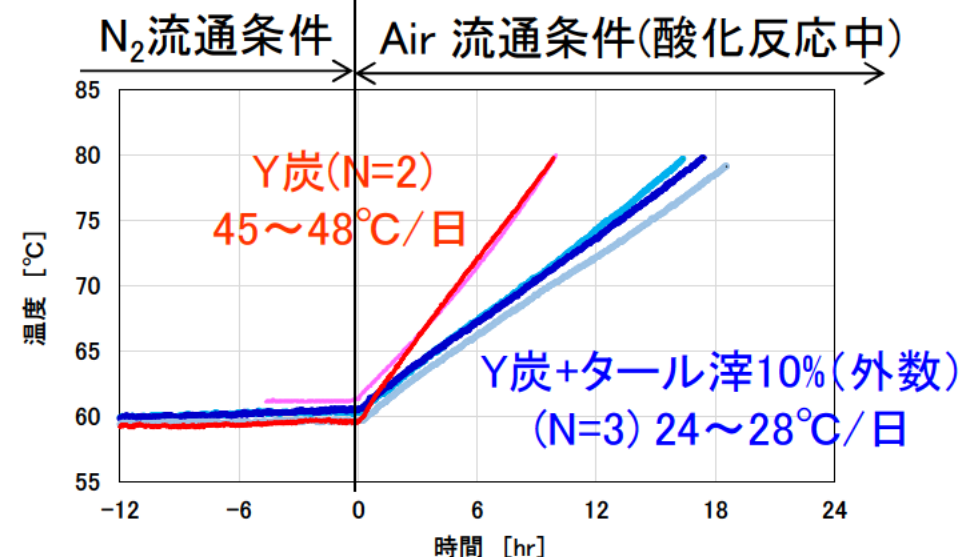
同位体ガス発生量測定

Y炭(dry)+ $^{17}\text{O}_2$ CO_2 ガス分析



タール滓添加により、80°Cにおける CO_2 発生量は半減
特に雰囲気 $^{17}\text{O}_2$ 由来 CO_2 は1/3程度に減少

中型低温酸化評価装置 (2kg規模)



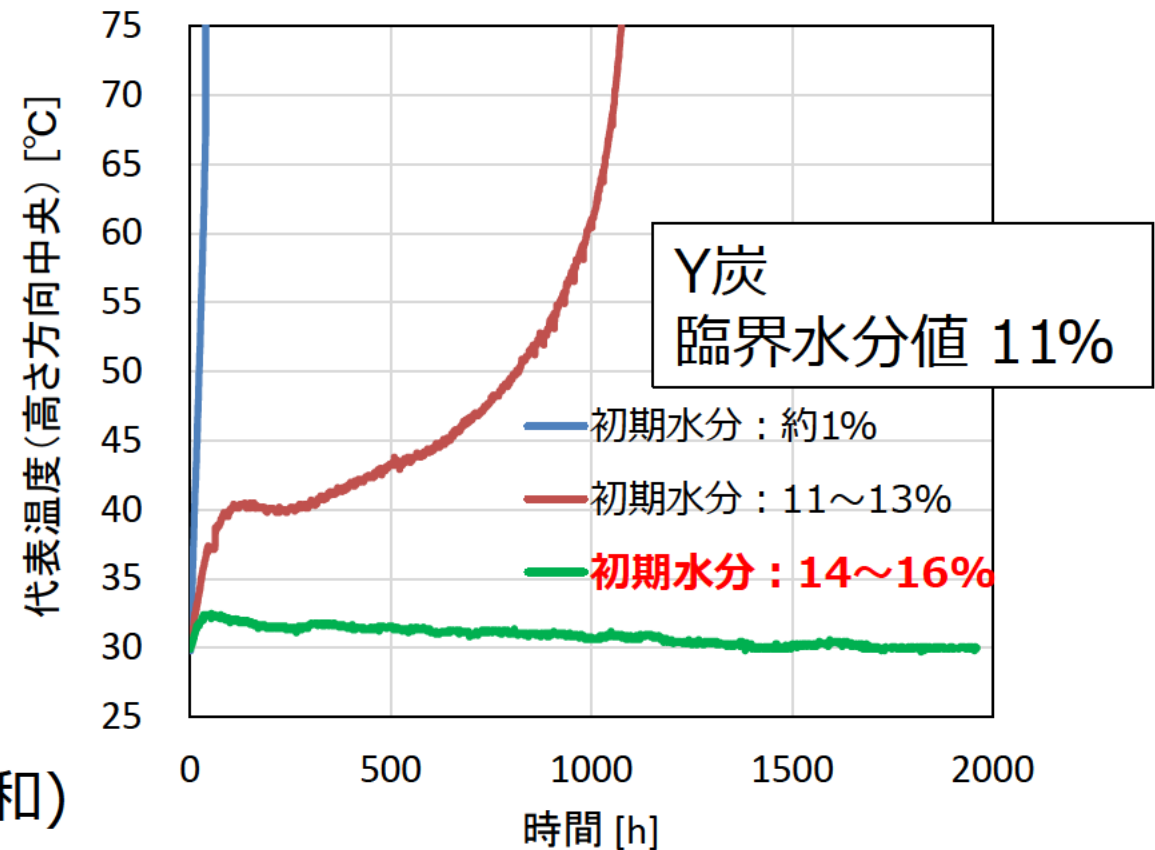
2kg規模の自然発熱性評価試験で、タール滓添加による昇温速度の低下を確認

自然発熱抑制技術の検証-1

○固体燃料自然発熱性評価実証試験装置(300kg/ch) :
初期水分値管理による発熱抑制



ガス温度 : 30℃ (層内温度追従)
ガス流量 : 50L/min, Air
ガス湿度 : 30g/m³ 一定(30℃飽和)



初期水分値 > 臨界水分値(11%) の管理によって、
自然発熱を抑制可能

自然発熱抑制技術の検証-2

○大型低温酸化評価装置(500kg/ch)：

発熱抑制剤（タール滓）添加による酸化発熱抑制

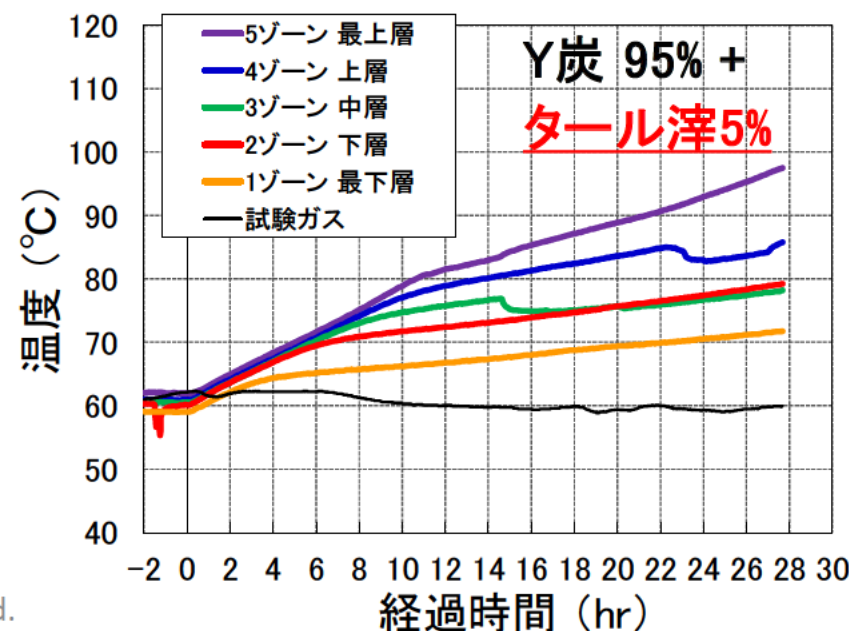
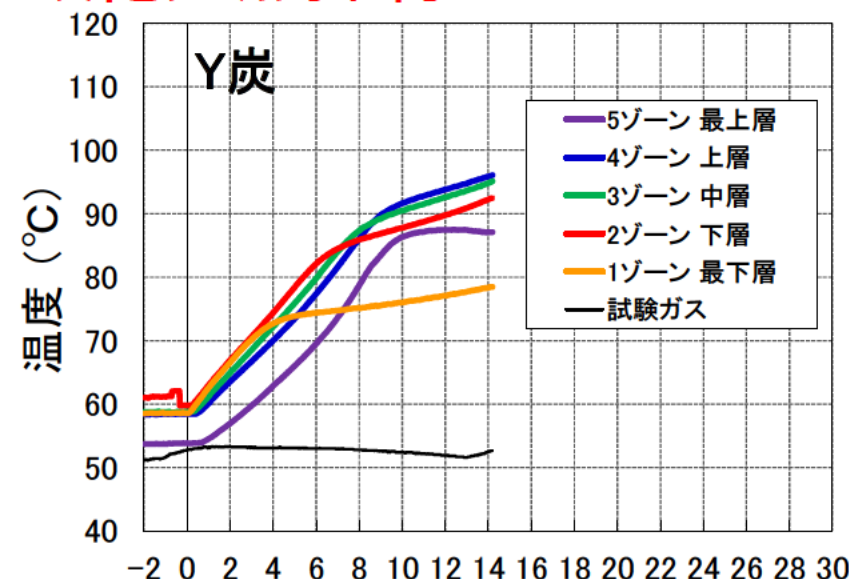


ガス温度：約60℃ 一定

ガス流量：30L/min, Air

ガス湿度：相対湿度40～50%

タール滓5%添加により、
60℃以降の昇温速度が半減

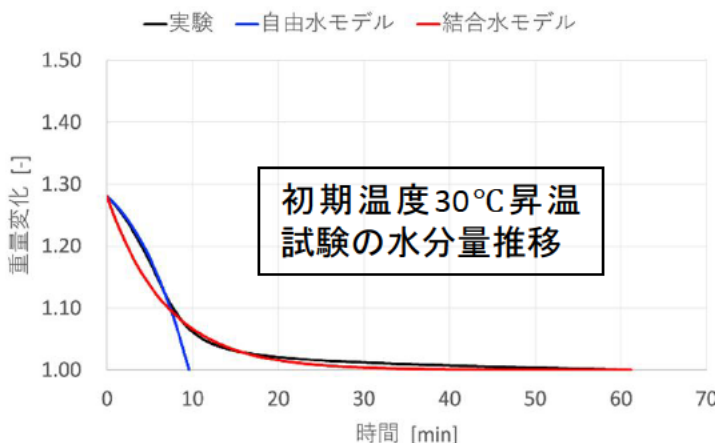


数値計算による検証

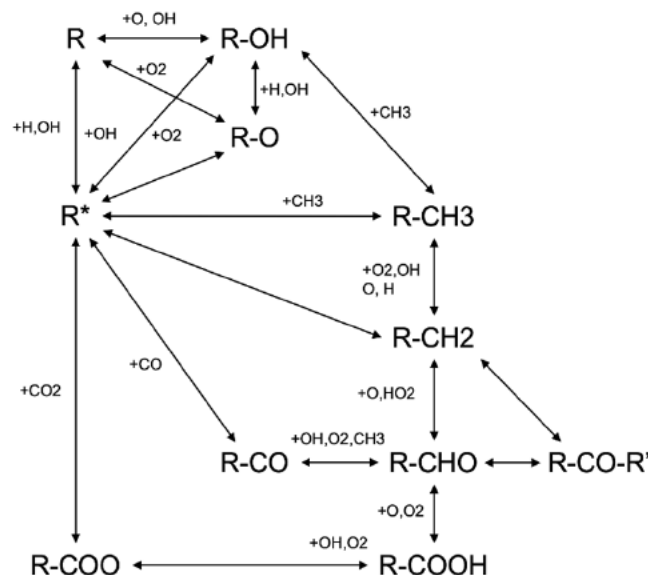
- 実施項目
- ・2023年度: 水分吸脱着モデル, およびラジカル反応モデルの数値解析ツールへの導入
 - ・2024-25年度: 数値解析ツールを用いた大型設備内石炭充填層の自然発熱現象の予測

- ・水分吸脱着モデル、および
- ・自然発熱ラジカル反応モデルを構築

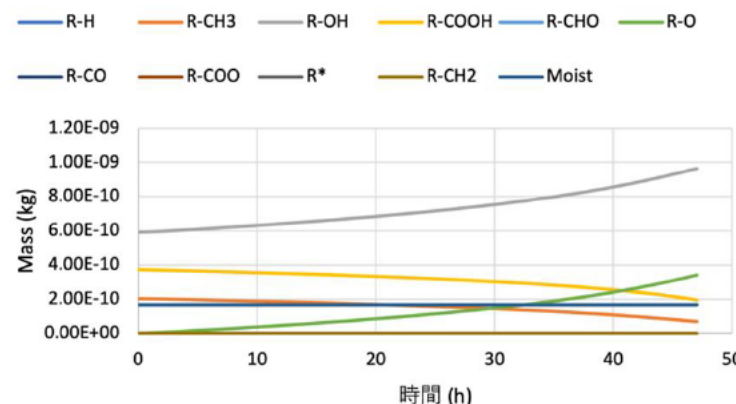
○数値解析ツールへ導入するとともに、実験との比較等を通じて精度向上、高度化を実施



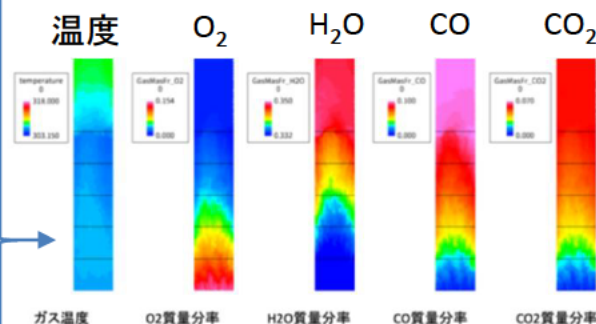
水分吸脱着モデルと実験との比較



石炭自然発熱ラジカル反応モデルの提案



自然発熱時の石炭官能基の推移の予測

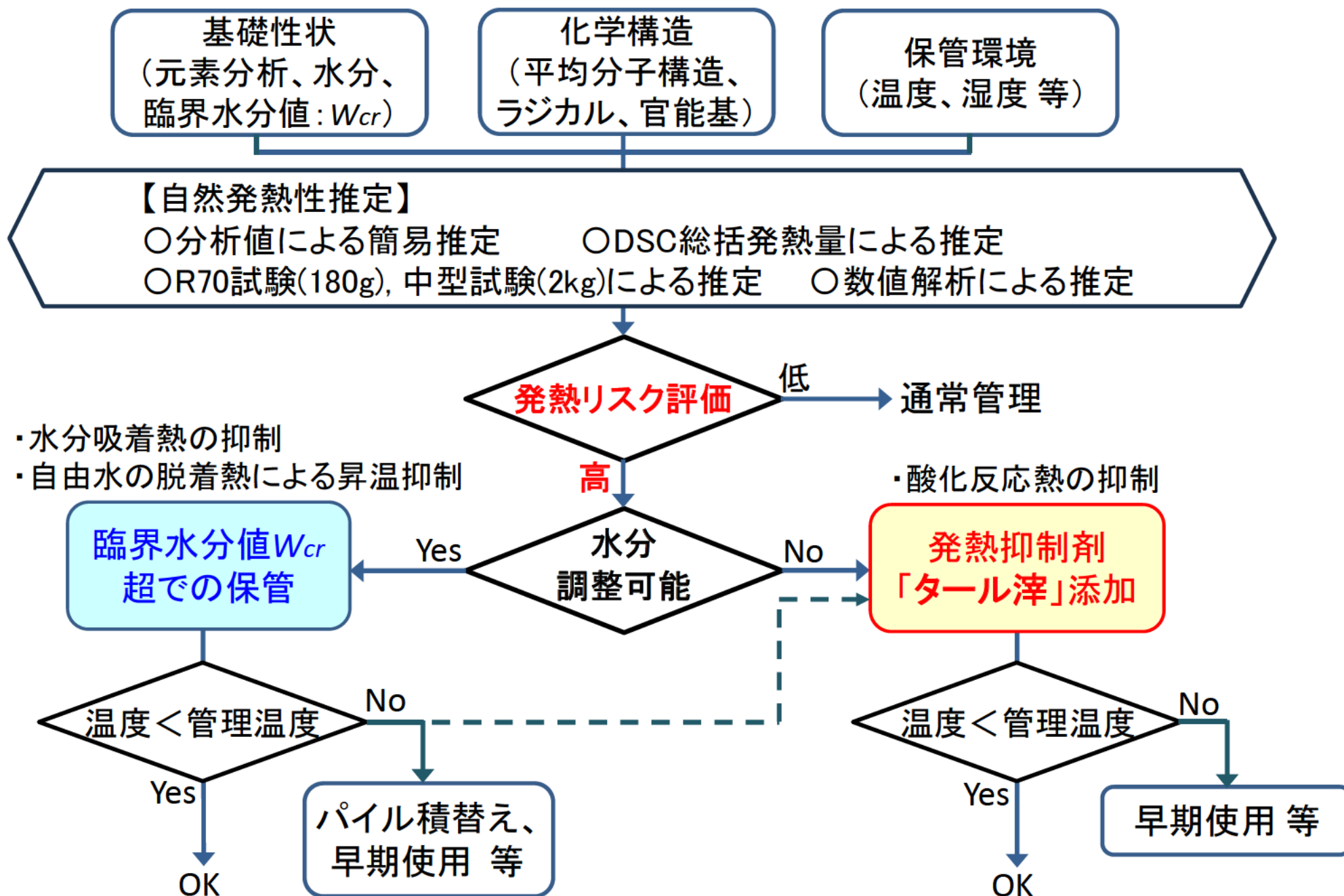


石炭充填層 (300kg/ch)
温度・ガス濃度分布の予測
(t=40min)

●水分吸脱着モデルおよび自然発熱ラジカル反応モデルが導入された数値解析ツールを大型設備内石炭充填層 (300kg/ch) の自然発熱現象予測へ適用

本解析ツールにより、充填層内の反応および昇温挙動を詳細に捉えることが可能になった。

石炭の自然発熱抑制指針



プロジェクト成果 まとめ

石炭の自然発熱現象の解明、及びその抑制技術を開発した。

- ・ 自然発熱現象について「水分吸脱着」と「酸化反応機構」に基づき解析を行い、発熱メカニズムを明らかにした。
- ・ 自然発熱メカニズムに基づき、発熱抑制技術として、初期水分管理と発熱抑制剤（タール滓）添加を提案した。
ラボレベル～500 kgオーダーの各種解析・発熱試験装置を用いて、これらの発熱抑制技術の妥当性を検証した。
- ・ 得られた水分吸脱着機構および酸化反応機構をモデル化し、従来の数値解析手法に取り込むことで、自然発熱現象を再現することができた。

実用化・事業化の見通し

- ・ 自然発熱性評価、発熱抑制技術をユーザーに広く周知し、石炭の自然発熱低減に向けた技術的・運用的改善に貢献する。

	2024FY	2025FY	2026FY	2027FY	2028FY	2029FY	2030FY以降
自然発熱リスク分析・評価法の社会実装	NMR測定 高スループット化 (日本製鉄)		リスク分析・評価法の社会 実装に向けた体制整備 (分析会社含めた体制構築)		暫定的社会実装 (課題点抽出、改良)		自然発熱リスク分析・評価法 として正式な社会実装 (石炭ユーザーに広く展開)
	臨界水分値(W_{cr}) 測定法確立(電中研)						
自然発熱抑制技術の社会実装	自然発熱抑制技術 の開発		自然発熱抑制技術に関する 情報発信		暫定的社会実装 (課題点抽出、改良)		自然発熱抑制技術として 正式な社会実装 (石炭ユーザーに広く展開)
	自然発熱抑制指針 の提示						