湿式排煙脱硫装置最適プラント制御用炭カルセンサの開発

Development of Automatic Calcium Carbonate Slurry Analyzer for Optimum Control System of Desulfurization Plant

技術本部　沖野　進[*1]　河野　進[*2]
坂本令子[*3]
機械事業本部　大島道雄[*4]　井上清治[*5]

湿式排煙脱硫装置の吸収液スラリー中に存在する石灰石濃度が連続分析できる炭カルセンサを開発・実用化した．炭カルセンサは，吸収液スラリーが一定流量で連続採取されるスラリーサンプラと，サンプルと硫酸を反応させCO_2ガスを発生させる反応器と，発生したCO_2ガスを検出するガス分析計と，吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度の計算と分析計の制御を行う制御部で構成されている．この炭カルセンサは脱硫装置の最適制御システムのキー技術である．最適制御システムでは，炭カルセンサで吸収液スラリー中の石灰石濃度を連続的に検出し原料石灰石の供給量を制御して石灰石濃度を一定に保つ．一方，吸収液循環流量を可動翼ポンプにて連続的に変えて脱硫率を所定値に保つ．本最適制御システムにより(1) 脱硫制御の信頼性向上，(2) ボイラ負荷の追従性向上，(3) 副生石こう純度維持，(4) 省エネルギー化が達成できる．

A $CaCO_3$ slurry analyzer ($CaCO_3$ sensor) capable of making continuous analysis of limestone concentration in absorbent slurry of wet type flue gas desulfurization (FGD) system has been developed and applied in industrial plants. The $CaCO_3$ sensor consists of a slurry sampler for sampling absorbent slurry continuously at a fixed flow rate, a reactor for generating CO_2 gas from the sample by addition of sulfuric acid, a gas analyzer for detecting the generated CO_2 gas, and a controller unit for the $CaCO_3$ concentration calculation in absorbent slurry and the analyzer. This $CaCO_3$ sensor is the key technology for optimum control of the FGD facility. In the optimum control system, limestone concentration is maintained at a fixed value by controlling the raw limestone supply with continuous detection of absorbent slurry limestone concentration with this $CaCO_3$ sensor. On the other hand, the designed desulfurization efficiency is maintained by continuous control of the recirculated absorbent liquid flow rate with variable vane pitch pump. Application of this optimum control system provides ; (1) Improved reliability of the desulfurization control, (2) Improved follow-up ability of the boiler load, (3) Retention of the by-product gypsum purity, (4) Energy conservation.

1. まえがき

近年，地球環境問題が大きな関心を集めており，その中でもSO_x低減対策としての排煙脱硫技術はますます重要性を増している．当社は，湿式石灰石こう法による燃焼排ガスからの脱硫技術を1972年に実用化以来，火力発電所からの大容量の排ガスを処理するプロセスを，国内外に多数設置してきた．

現在，排煙脱硫装置は高性能化の改善がなされる一方で，より運転信頼性が高く扱いやすい装置が要望されている．

具体的なニーズとしては (1) 省エネルギー化，(2) 副生石こうの純度維持，(3) 高速負荷変動への追従が挙げられる．

これらの要求にこたえるため，吸収液スラリー中の石灰石（$CaCO_3$：炭カル）濃度の連続分析計（以下“炭カルセンサ”と称する）を開発し，これを脱硫装置最適制御システムに適用し，実機での実証試験を経て実用化した．

この新しい制御方法は，従来方式に比べて負荷追従性の向上，石こう純度維持に顕著な効果を示し，大幅な省エネルギー化を達成した．以下に炭カルセンサと最適制御システムの概要と試験結果及び実機実証試験データを紹介する．

2. 炭カルセンサの開発，実用化

湿式石灰石こう法脱硫装置内では，液相に吸収されたSO_2と中和剤である石灰石（$CaCO_3$）が反応して石こうに転換されており，吸収液スラリー中には未反応の石灰石と石こうが混在している．吸収液スラリー濃度はポンプの摩耗などの面から上限を設けており，吸収液スラリーの反応性を向上させるために未反応石灰石濃度を高めると副生石こう純度が低下する．

したがって，吸収液の反応性と副生石こう純度の両方を満足させる制御が必要で，そのためには吸収液スラリー中の石灰石濃度を連続分析できる炭カルセンサの開発が必要であった．

表1に吸収液スラリーの組成の例を示す．

表1　脱硫装置吸収液スラリーの組成例
Properties of absorber recirculation slurry

項目	組成
①石こう：$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	215 g/l
②石灰石：$CaCO_3$	5.6 g/l
③その他	1.3 g/l
固形分中の含有率	
①石こう：$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	96.9 %
②石灰石：$CaCO_3$	2.5 %
③その他	0.6 %

2. 1 炭カルセンサの概要

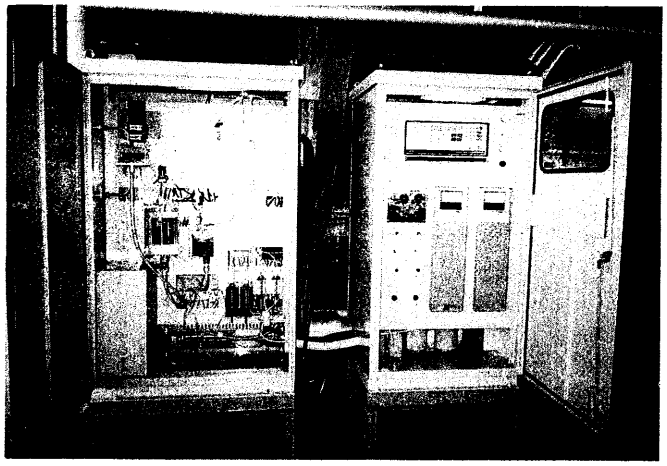
図1に炭カルセンサの外観写真と基本原理を示す．

吸収液スラリーは，スラリーサンプラにより10 ml/minの流量で反応器に定量供給され，反応器内で$CaCO_3$は硫酸と反応してCO_2に全量分解される．

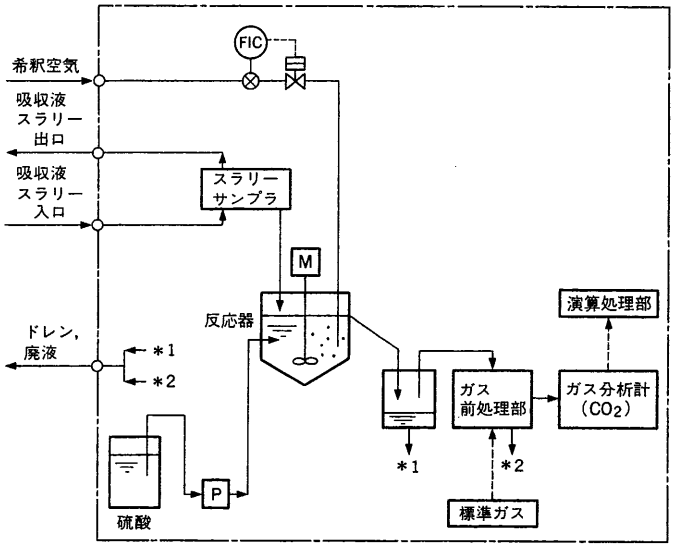
$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2 \quad (1)$$

発生したCO_2ガスは，反応器に一定流量で供給されている空気

*1 広島研究所化学プラント研究推進室　*4 化学プラント技術センター環境プラント部主務
*2 広島研究所制御システム研究室主務　*5 化学プラント技術センターエンジニアリング部
*3 広島研究所制御システム研究室



(a) 外 観



(b) 炭カルセンサの基本原理

図1 炭カルセンサの外観写真と基本原理 炭カルセンサの機器構成及び測定フローを示す.
Appearance and principle of automatic $CaCO_3$ slurry analyzer

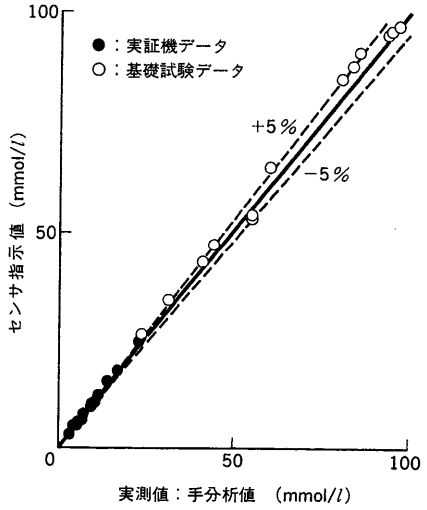
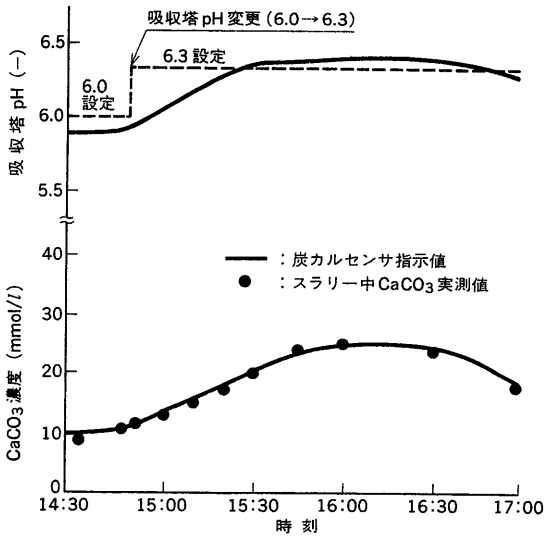
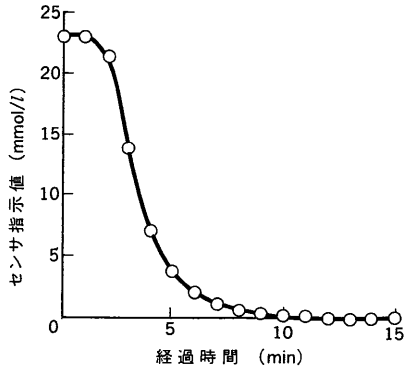


図2 実測値と炭カルセンサ指示値の相関 センサ指示値は実測値と良い一致を示している.
Relationship between measurement by manual titration and indication by $CaCO_3$ analyzer



(a) 吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度とセンサ指示値の関係



(b) 炭カルセンサ指示値の応答性

図3 実証試験での応答性試験結果 (a) センサ値は実測値の$CaCO_3$濃度と良い一致を示している. (b) 応答性試験における炭カルセンサの指示値変化の例を示す.
Response test results of $CaCO_3$ analyzer (Demonstration test)

により希釈後ガス前処理装置を介してCO_2ガス濃度分析計（赤外式吸光法）に送られ，発生量が計算される．吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度は，CO_2ガス発生量及び吸収液スラリーサンプリング流量の各値から計算される．

吸収液スラリー中に含まれる石こう及び石灰石の固体粒子は沈降による閉そくトラブルや摩耗を起こしやすく，開発に当たっては基礎検討を実施し，閉そくトラブルのない構造のセラミック製スラリー用微少流量サンプラを新たに製作した．これにより，硫酸や廃液処理に要する運転費が少なく，スラリーによる閉そく・摩耗等のトラブルもなく信頼性の高い連続分析計ができた．

2. 2 試 験 結 果

まず炭カルセンサの試作機を製作し，当社広島研究所で特性確認試験を実施した．次に東北電力(株)八戸火力発電所の4号脱硫装置に実証機を設置し，約2年間の実証運転により，センサの信頼性の確認を経て実用化した．

現在，米国向け脱硫装置に1台，国内向け脱硫装置に3台設置され順調に稼働中である．

(1) 分析精度

図2に吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度の実測（手分析）値とセンサの指示値との相関を示す．センサ指示値は，±5％以内の誤差で実測値と一致していることが確認された．

(2) 応答性

実証運転において，吸収塔pHの設定変更によって吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度を変化させ，指示値の応答性を測定した結果を図3 (a)に示す．

約70 minで$CaCO_3$濃度が10から25 mmol/lに上昇しているが，実測値とセンサ指示値は良い一致を示し，指示の応答遅れは実用上問題ないことが確認できた．

炭カルセンサへの供給を，吸収液スラリーから工業用水に切替えて，センサの検出遅れの評価を行った．図3 (b)に切替え後の経過時間と指示値の相関を示す．センサの検出遅れは，むだ時間が2 min，時定数が1.7 minであり，指示値95%の変化に約5 min必要であることが分かった．ただし，脱硫装置の吸収塔の吸収液滞留時間が数時間であるため，本センサの指示遅れは実用上問題なく，連続分析計として適用可能であることが確認された．

3．湿式排煙脱硫装置の最適制御システムの構築

当社では省エネルギー，省資源運転及び負荷変化への安定な追従性を目的とした湿式排煙脱硫装置用計算機制御システムASC-1000 (Advanced Scrubber Control System)[1]を開発済みである．今回炭カルセンサと可動翼循環ポンプを使用し，より簡易なDCS (Distributed Control System) で高度な制御を可能とするシステムを開発した．

従来，計器分析ができなかった吸収液スラリー中の$CaCO_3$濃度を連続分析できる炭カルセンサを開発したことにより，石こう品質を左右する$CaCO_3$濃度の制御が可能となった．さらに，可動翼ポンプが実用化され，脱硫性能に対して影響の大きい吸収液の循環流量を時間遅れなしで連続的に変更することができ，処理ガス中の出口SO_2濃度が高精度で制御可能となった．そこで，炭カルセンサと可動翼循環ポンプを用い，吸収剤供給流量の操作で$CaCO_3$濃度を，吸収液循環流量の操作で出口SO_2濃度（または脱硫率）を各々制御する制御システムを開発することとした．

各制御量はセンサを通じて検出するため，そのセンサの検出遅れによって制御性能に悪影響が及ぶこととなる．$CaCO_3$濃度制御については炭カルセンサのむだ時間が前述のとおり2 minであるのに対し，吸収塔の吸収液滞留時間は数時間であるため検出遅れの影響は少ないが，出口SO_2濃度制御（または脱硫率制御）ではSO_2分析計の検出遅れが2～5 minに対し，ガスの吸収塔内滞留時間は数sと小さいため高速負荷変化時の追従制御の対策が必要となってくる．

そこで，出口SO_2濃度制御（または脱硫率制御）にむだ時間補償機能を有する“モデル予測制御法”[2]を適用し，プロセスの真の出口SO_2濃度を予測し，その予測値を制御量に用いることでプロセスの応答遅れ及びセンサの検出遅れをカバーする制御システムを構築した（図4）．

(1) $CaCO_3$濃度制御

$CaCO_3$濃度制御ロジックは，排ガス流量と入口SO_2濃度によるフィードフォワード制御と炭カルセンサの分析値によるフィードバック制御からなる．

(2) 出口SO_2濃度制御（脱硫率制御）

出口SO_2濃度制御ロジックを図5に示す．出口SO_2濃度制御ロジックは，モデルによる出口SO_2濃度の予測値を用いたフィードバック制御である．ただし，予測値は出口SO_2センサの検出値をフィードバックして常に誤差補正が行われ，補正された予測値を制御量として用いている．モデルは，吸収液循環流量

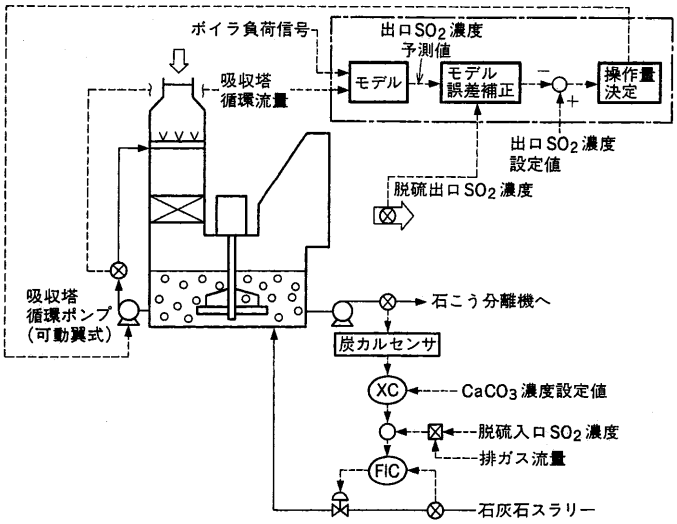


図4　排煙脱硫装置の最適プラント制御システム　炭カルセンサと可動翼循環ポンプを用いた制御システム．
Optimum control system of desulfurization plant

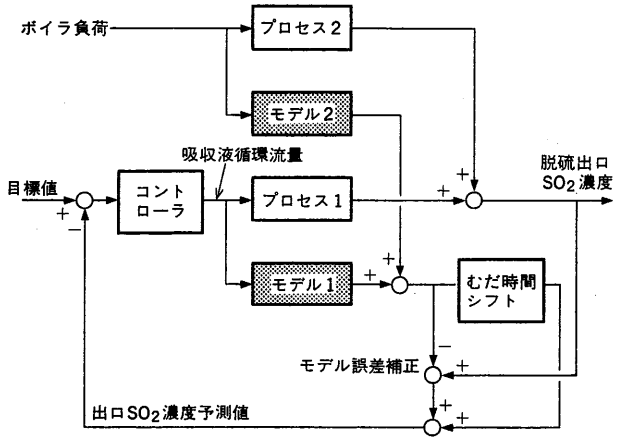


図5　出口SO_2濃度制御ロジック　モデル予測制御法を適用．
Outlet SO_2 control logic

の変動に対する出口SO_2濃度の変動モデル（モデル1）とボイラ負荷の変動に対する出口SO_2濃度の変動モデル（モデル2）の2種類のモデルを有し，この2つのモデルを組合わせ出口SO_2濃度を予測している．予測値を用いることによって，検出遅れ分だけ早めに循環流量を操作することができむだ時間補償を行っている．

また，モデルにより予測した出口SO_2濃度に対し，出口SO_2濃度センサから得られた分析値との偏差をモデル誤差とみなし予測値を補正している．ただし，分析値には検出遅れがあるため，比較する出口SO_2濃度の予測値は現在のプロセスの予測値ではなく，検出遅れを考慮した検出遅れ時間だけさかのぼった数min前のプロセスの予測値を用いる．ここで求めたモデル誤差で現在のプロセスの予測値を補正し，この値が目標値の出口SO_2濃度と一致するように吸収液循環流量を決定する．なお，脱硫率制御の場合，脱硫率から出口SO_2濃度設定値を計算する以外は出口SO_2濃度制御と同等である．

4．実証試験結果

本制御システムの実プラントにおける実証試験を，東北電力(株)能代発電所2号機排煙脱硫装置において実施した．図6に実証試験装置の概要を示す．ボイラは出力600 MWで，排ガス流量は

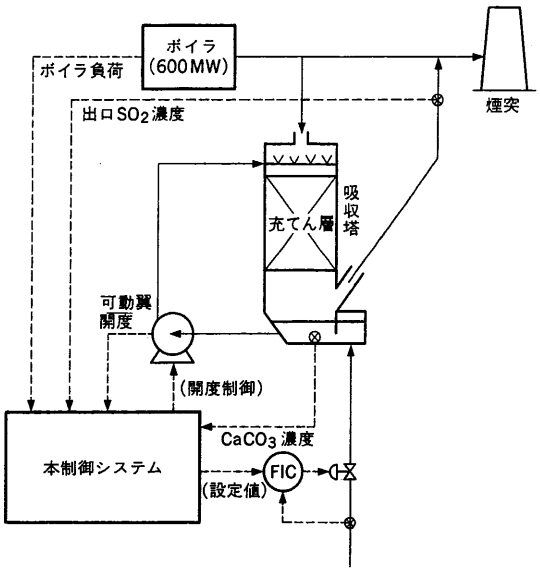


図6　実証試験装置の概要　出口 SO_2 濃度制御（モデル予測制御法を適用）と $CaCO_3$ 濃度制御.
Configuration of optimum control system of desulfurization demonstration plant

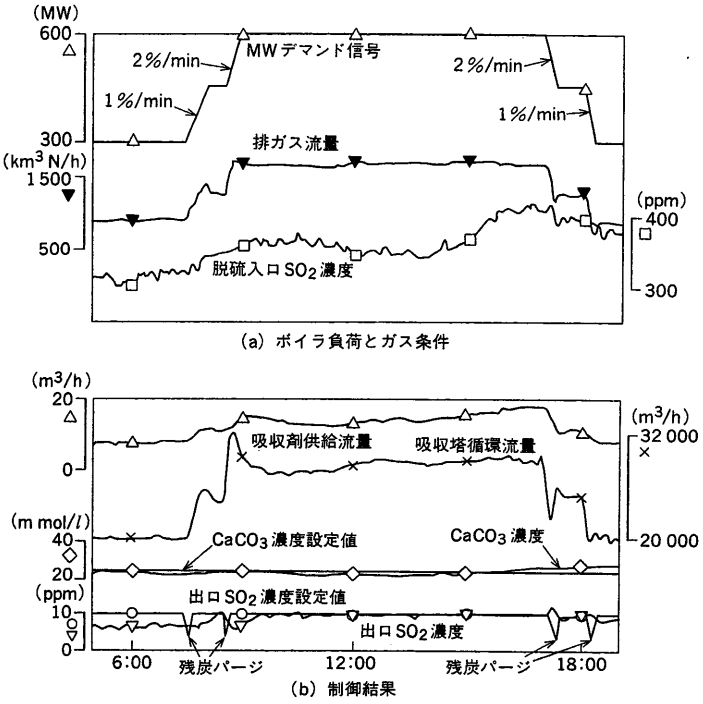


図7　実証試験の24時間運転結果　東北電力(株)能代発電所2号機（600MW）にて，最適制御システムによる24時間連続運転を行った.
Test result of 24 hours operation (Demonstration test)

約180万 m^3N/h である．本プラントには既設の計算機制御システム（ASC-1000）が据付けられているが，本制御システムの実証試験では，ASC-1000に替え，本制御システムを組込み運転した．本制御システムは，$CaCO_3$ 濃度検出値，出口 SO_2 濃度検出値，ボイラ負荷信号，吸収液循環ポンプの可動翼開度及び稼働台数から吸収剤供給流量と吸収液循環流量を操作できるようにした．

図7に24 h 連続運転の試験結果を示す．ボイラ負荷は，50%（300MW）から100%（600 MW）の間を1 %/min 及び2 %/min の変化で上昇，下降している．出口 SO_2 濃度一定制御，$CaCO_3$ 濃度一定制御を行っている．この結果，$CaCO_3$ 濃度は一定値を保ちながら，一方，出口 SO_2 濃度は目標とした出口 SO_2 濃度に対して負荷変動時においても出口 SO_2 濃度のオーバシュートはほとんどなく，一定制御できる良好な追従性を示している．さらに本制御システムによれば，脱硫負荷が低いときには循環流量が絞られ，その分ポンプ動力が節減され省エネルギーとなる．

5. あ と が き

従来，計器分析のできなかった湿式脱硫装置の吸収液スラリー中未反応石灰石濃度を連続分析できる炭カルセンサを開発実用化した．このセンサを使用して，未反応石灰石を一定濃度に制御して副生石こうの純度を保ちつつ，吸収液循環流量を可動翼ポンプにて変えて脱硫率を所定値に保つ最適制御を開発した．

本システムの有効性を，実機（600 MW）実証試験で確認した．負荷変化に対しても安定して所定の脱硫率を維持し，省エネルギー運転ができることを検証した．

本炭カルセンサは，既に米国及び国内向け脱硫装置に付設され順調に稼動している．最適制御システムも国内向け脱硫装置に採用され現在順調に稼働中であり，今後の新設大型火力向けや既設の排煙脱硫装置の性能向上と省エネルギーに役立つものと期待される．

おわりに，実機実証試験に多大な御協力を頂いた東北電力(株)を初め関係各位に感謝の意を表します．

参 考 文 献

(1) 池内ほか，排煙脱硫装置における計算機制御システムの開発，三菱重工技報　Vol.21　No.3（1984）
(2) 西谷紘一，モデル予測制御の応用，計測と制御　Vol. 28　No. 11（1989）