低低温EP適用による石炭火力用排煙処理システムの合理化設計

Rationalized Design of Total Flue Gas Treatment System for Coal-Fired Boiler by Application of Colder ESP

機械事業本部　藤島英勝*1　清水拓*2
神戸造船所　土屋喜重*3
三原製作所　西田定二*4
中部電力株式会社　田中雅*5

10 mg/m³N 以下の厳しい排出ばいじん濃度を達成する従来の石炭火力用排煙処理システムは，乾式EP，除じん塔のあるスート分離方式脱硫及びノンリーク型GGHの組合せに湿式EPを追加して所定の除じん性能を達成する．しかしこの場合システムが複雑となり設備費と運転費も高くなるという課題があった．この解決のためGGHの熱回収器をエアヒータの後に設置して乾式EPを90℃前後で運転することにより，灰の電気抵抗率を低下させ，逆電離現象を解消して除じん性能を向上させた．また吸収塔のスプレーを強化して除じん性能を高めた．その結果除じん塔と湿式EPを省略でき，これによって従来よりコンパクトで経済的なシステムになった．

To meet the severe demand to limit particulate emissions below 10 mg/m³N from the conventional flue gas treatment system of a coal fired boiler, combination of a dry type ESP, dual loop type FGD plant with a quencher and a nonleak type GGH needs to be supplemented together with a wet type ESP. However, such a system is more complicated and requires higher equipment and operation costs. This problem was solved by installing the heat extractor of the GGH downstream of the air heater to enable the dry type ESP to be operated at a temperature close to 90 ℃ so that the electrical resistivity of the ash could be lowered and thereby improve its particulate collection efficiency with elimination of the back corona phenomenon. Moreover, the particulate removal efficiency of the absorber was increased by intensifying the spray. As a consequence, a system more compact and economical than the conventional could be realized without the provision of the quencher and wet type ESP.

1. はじめに

エネルギー源の大半を海外から輸入する日本では，長期安定供給が見込める石炭を使用する石炭火力は原子力に次ぐベース電源に位置づけられる．近年，環境問題へ関心が高まるにつれ，石炭火力においても環境調和への配慮は極めて重要になりつつある．石炭火力の環境対策設備である排煙処理システムに対しては，特にSO_2及びばいじん排出濃度のこれまで以上の低減を求められる傾向にある．例えばばいじん排出濃度については，従来の20～30 mg/m³N から10 mg/m³N 以下を求められる都市近郊型石炭火力のケースもある．このケースでは従来のシステムに湿式電気集じん装置（湿式EP）を追加して除じん性能を上げることにより対応しているが，今後はより簡素な方式でこのような排出レベルを達成するシステムのニーズがある．

一方排煙脱硫装置（脱硫）の合理化については，従来のスート分離方式に対し除じん塔を省略したスート混合方式を採用することにより簡素化を図る例もある．しかしこの場合は，除じん性能の向上，副生石こうの高品質化及び使用可能な石炭の拡大等の面において制約があった．これに対し当社は中部電力(株)と共同で開発を行い，各構成機器の改良と性能の向上を達成し，最適システムとして再構築することにより大幅な合理化を実現した．すなわちSO_2 50 ppm 以下及びばいじん10 mg/m³N 以下を湿式EPを設置せずにスート混合方式にて達成するシステムを開発した．

本報では，乾式EPと吸収塔の性能を改善することにより従来方式の課題や制約を克服した石炭火力用“三菱高性能排煙処理システム”を紹介する．

2. 従来の排煙処理システムの課題と制約

ばいじんの排出濃度の低減に関しては，排煙処理システムを構成する各機器の組合せ方と各機器に与える除じん分担によって，その排出濃度の低減限界とシステムの経済性が大きく左右されることは周知の事実である．従来はばいじんの排出濃度が20～30 mg/m³N 以下程度であったため，乾式電気集じん装置（乾式EP）と脱硫の除じん機能を組合せることにより達成していた．

多種多様な海外炭を使用する我が国の石炭火力では通常多炭種対応設計が求められ，乾式EPにおいては集じん性の悪い石炭をベースとしたEP容量設計が行われている．乾式EPの位置としては，エアヒータ（AH）の後流に設置する低温EP方式（130 ℃前後）と，ボイラ節炭器の後流に設置する高温EP方式（380 ℃前後）がある．経済性を考慮するといずれの方式についても，乾式EP出口の計画ばいじん濃度としては100 mg/m³N 程度とし，極端に集じん性の悪い灰の性状をもつ石炭については除外するのが一般的である（図1）．

一方ノンリーク型ガスガスヒータ（GGH）の熱回収器は乾式EPの後流に設置され，排ガスが130 ℃前後から90 ℃前後に冷却される．ここで乾式EPを通過してきたガス状のSO_3はすべて凝縮してミスト化し，その一部はばいじんとともにGGH伝熱管へ付着するため，腐食やつまりの原因となりやすい（図2）．こ

*1 環境装置部主管
*2 化学プラント技術センター排脱プラント部次長
*3 機械・環境装置部集塵装置設計課主務
*4 一般機械設計部機械システム設計課主務
*5 電力技術研究所熱機械G研究主査

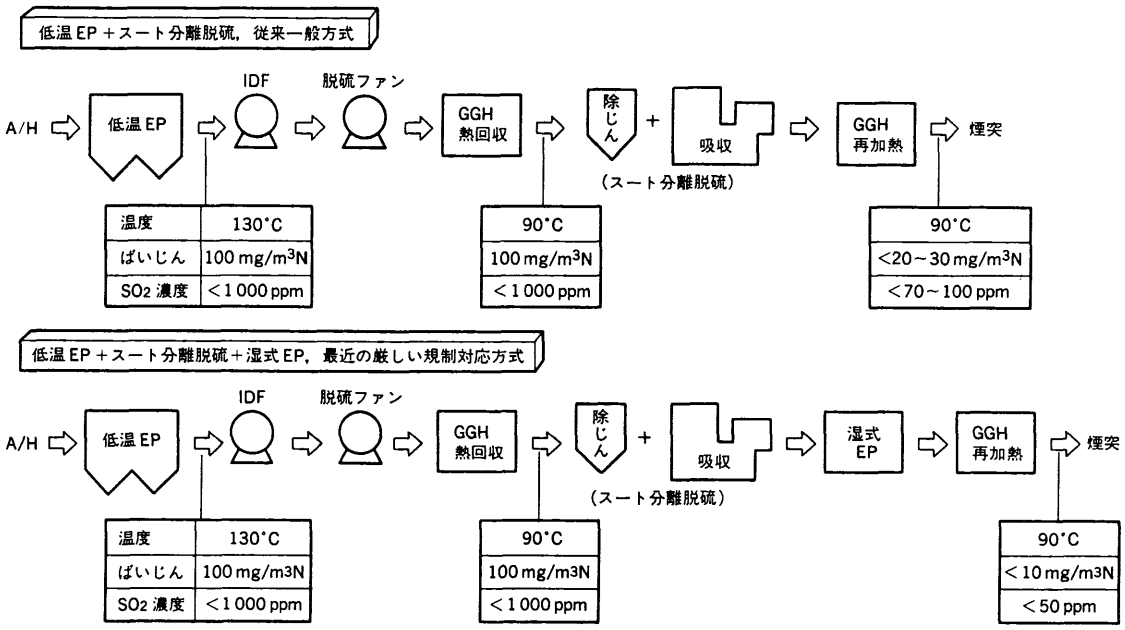


図1　従来の排煙処理システムの構成　低温EPでばいじん100 mg/m³N程度とし，GGHで熱回収後スート分離脱硫でSO_2とばいじんを除去する．出口ばいじん＜10 mg/m³Nに対しては湿式EPを設置する．
Arrangement of major equipment in conventional flue gas treatment system

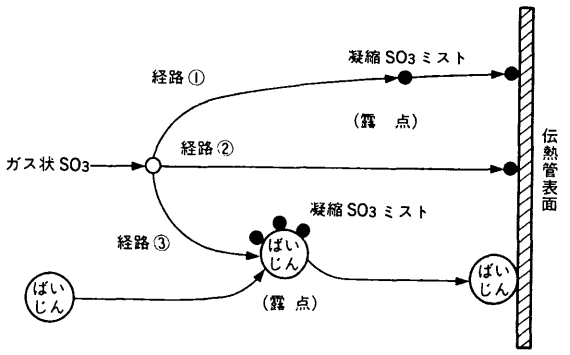


図2　ガス状SO_3の伝熱管表面への付着ルート　ガス状SO_3は，凝縮後①～③の異なる経路により，伝熱管表面に到達するが，ばいじんが多くなると，表面への到達割合は少なくなり腐蝕速度は減少する．
Route of condensation of gaseous SO_3 on tube surface

のため乾式EP出口のばいじん濃度を100 mg/m³N程度に調整してばいじん濃度と凝縮SO_3量の比を適正な範囲に保持することにより腐食対策を行っている．また伝熱管のつまりについては鋼球ショットクリーニング方式（SSCS）の採用により効率的に付着灰を除去して対策している．このように乾式EPの経済性とGGHの伝熱管の保護の観点から，乾式EP出口ばいじん濃度は100 mg/m³N程度で計画されている．

脱硫では，吸収塔の前に除じん塔を設置するスート分離方式の採用により，除じん塔でばいじん濃度100 mg/m³N程度を30 mg/m³N以下に下げ，さらに吸収塔でも除じんを行うことにより煙突入口ばいじん濃度20～30 mg/m³N以下を十分に満足している．除じん塔を設置して吸収塔入口ばいじん濃度を下げることは，吸収塔で生成する石こうの純度を高め，石こうボードに適した高品質の石こうとして回収する点でも重要である．設備費低減のため除じん塔を設置しないスート混合方式として，吸収塔で20～30 mg/m³N以下を達成する方法もある．しかしこの場合石こうの純度が低下したり，排ガス中のHClやHFにより石灰石の反応性が影響を受け脱硫制御が不安定となることがある．したがってこの方法は使用石炭を限定し，しかも純度が低くてもよいセメント添加用石こうとして回収する場合に限られる．

従来の方式では煙突入口のばいじんの濃度の限界としては，20～30 mg/m³N以下程度となるが，最近では煙突入口ばいじん濃度10 mg/m³N以下の低濃度が求められるケースもでている．この場合はGGHをノンリーク型とし，脱硫は除じん塔を有するスート分離方式とし，さらに湿式EPを吸収塔の出口に設置することにより達成している．今後このような煙突入口10mg/m³N以下対応のケースが増えるものと予想されるが，20～30mg/m³N以下対応に比べて，システム構成が複雑となり設備費も増えることから合理化が求められていた．

3．低低温EPとスート混合方式脱硫による高性能化

10 mg/m³N以下対応としては湿式EPを設置せずに乾式EPと吸収塔の除じん性能を上げる経済的な方法を開発した．一つはノンリーク型GGHの熱回収器を乾式EPの前に設置して，乾式EPを90℃前後で運転する低低温EP方式の採用である．これによってEPの集じん性能を向上させ，従来のEPとほぼ同等の集じん面積でEP出口ばいじん濃度を30 mg/m³N以下に下げ，脱硫は除じん塔を省略したスート混合方式とした．次に吸収塔でのスプレーを強化することにより除じん性能と脱硫性能が向上し，SO_2 50 ppm以下及びばいじん10 mg/m³N以下を湿式EPなしで達成する方式（高性能排煙処理システム）を実現した（図3）．

乾式EPの高性能化には，高電気抵抗灰による逆電離現象の克服が必要である．90℃前後のガス温度の下で運転されるこの低低温EPでは灰の電気抵抗率が大幅に低下し，逆電離現象を完全に解消できる特徴がある（図4）．これにより従来は極端に集じん性が悪く除外していた石炭に対しても正常な荷電状態が確保され集じん性能の大幅な向上が達成される．一方灰の電気抵抗率が下がると，いったん集じん電極に捕集された灰の電気的付着力が弱くなり従来よりも灰の再飛散量が増加し集じん性能が低下することが判明した〔図5(a),(b)〕．このため槌（つい）打時の再飛散を防止し電極の清浄度を向上させるダンパ連動無荷電槌打方式

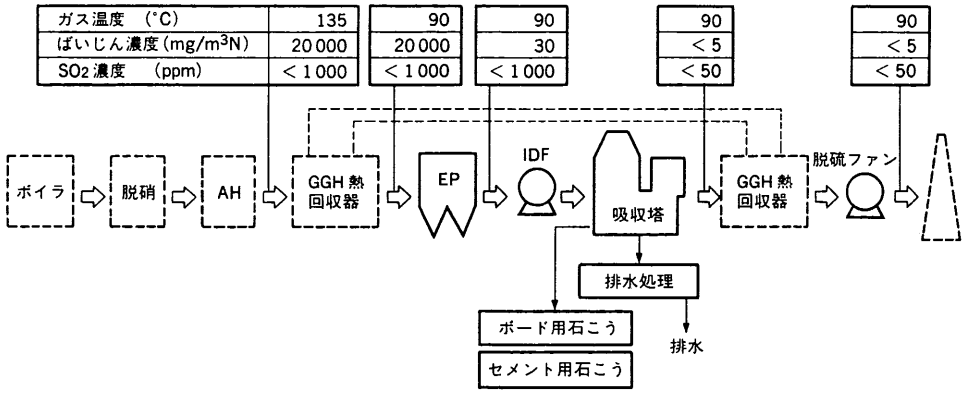


図3　高性能システムの構成　GGH 熱回収器の後に低低温 EP を設置し，スート混合方式脱硫で出口ばいじん 10 mg/m³N 以下及び出口 SO_2 50 ppm 以下を達成する．
Arrangement of major equipment in high efficiency flue gas treatment system

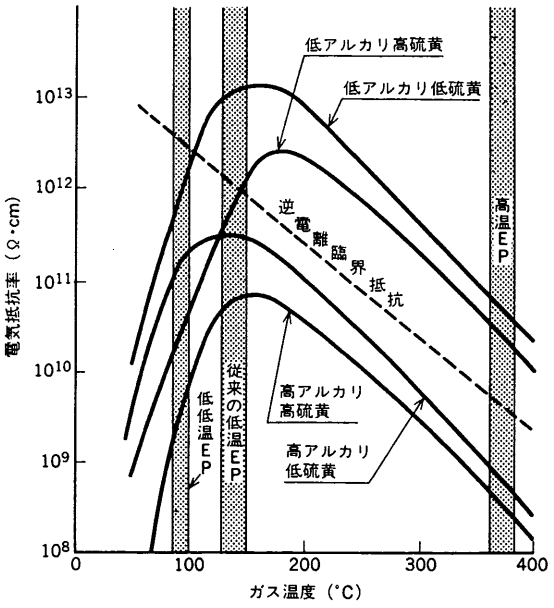


図4　ガス温度と石炭灰の電気抵抗率　低低温 EP の 90 ℃前後のガス温度では灰の電気抵抗率は大幅に低下し，石炭性状に関係なく逆電離の発生が防止できる．
Gas temperature and flyash resistivity

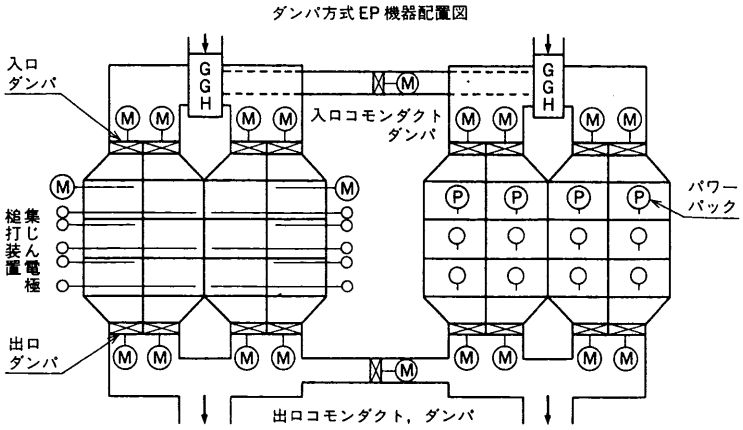
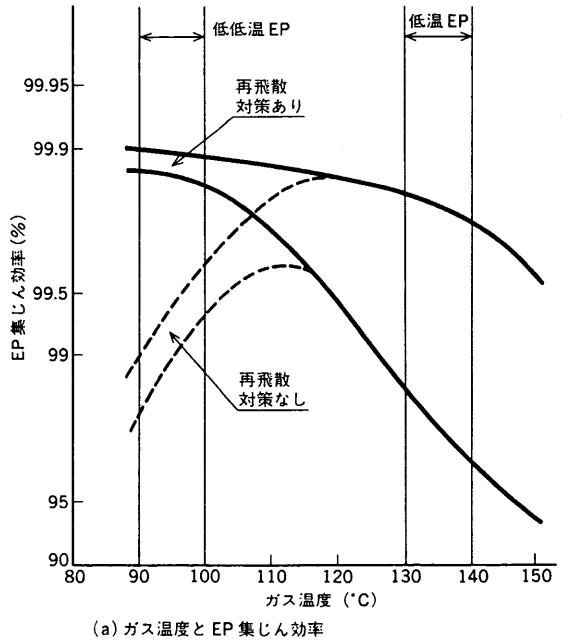
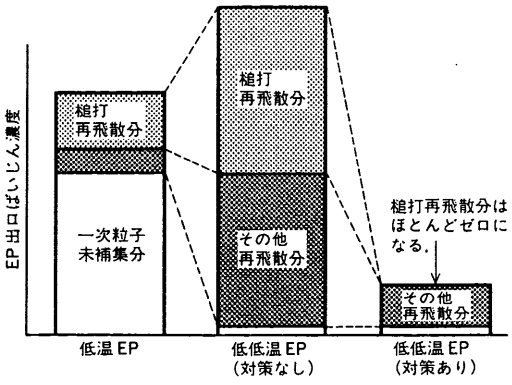


図6　低低温 EP におけるダンパ方式の適用　風量調整付ダンパ連動無荷電槌打方式の採用により，効果的にダスト再飛散を防止できる．
Application of off-flow rapping system with damper for colder ESP

(図6) 及び新型放電極の採用などで対策し，性能回復を図っている．低低温化に伴う腐食，ダスト固着については特に問題はないことが確認された．ただし捕集灰の流動性の低下に対しては，加温の強化とホッパ形状及び付属設備の最適化，EP 槌打運用に合わせた灰の収集方法等により対応している．



(a) ガス温度と EP 集じん効率



(b) EP 出口ばいじん濃度の構成

図5　ガス温度と EP の集じん効率及び EP 出口ばいじん濃度の構成
(a) 低低温 EP では灰の電気抵抗率が大幅に低下するため逆電離を解消できるが，反面再飛散が増加する．適切な再飛散対策をとることにより，大幅に集じん効率を向上できる．(b) 従来の低温 EP では一次粒子未捕集分が主体となるのに対し，低低温 EP では再飛散分が主体となる．適切な対策により，低ばいじん濃度を達成できる．
Relation between gas temperature and collecting efficiency of particulate by ESP, and constituent of particulate at ESP outlet

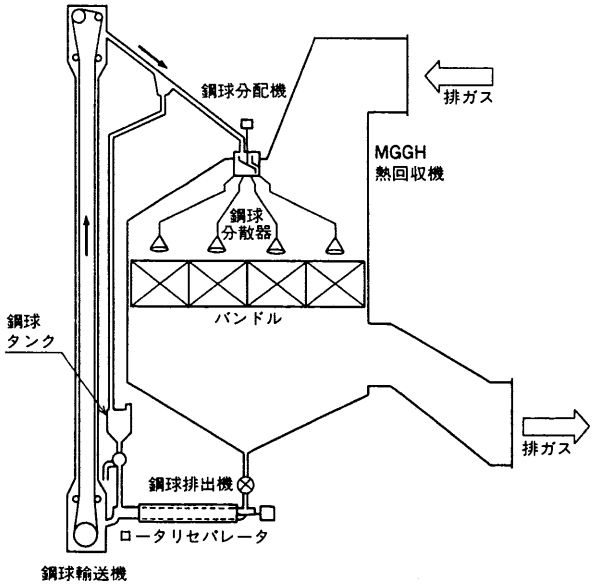


図7　高ばいじん対応 GGH 熱回収器と SSCS
EP 前流に設置される高ばいじん濃度対応の GGH 熱回収器において，鋼球は底部から回収され，ロータリセパレータ，鋼球輸送機を経由して鋼球分配機からバンドル上に散布され，付着灰を除去する．
SSCS (Steel Shot Cleaning System) and heat extractor of GGH for high particulate loading

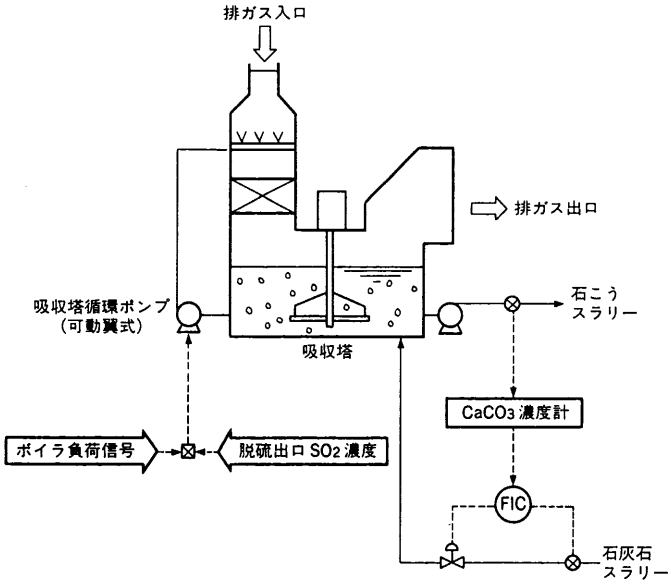
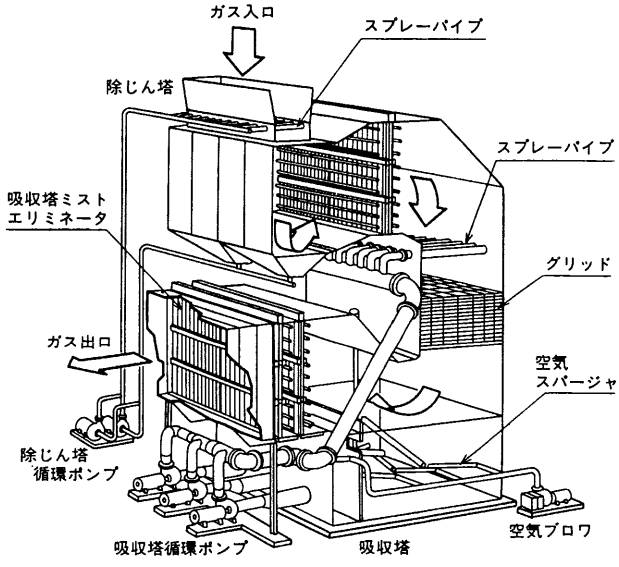
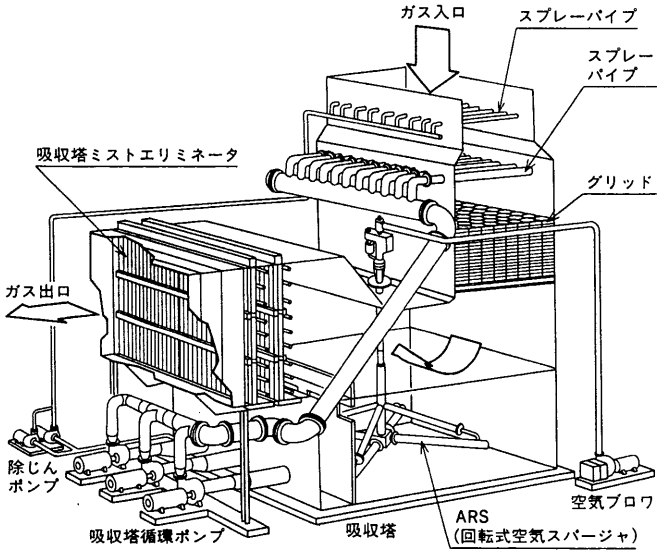


図9　スート混合方式に適した脱硫制御方式　石灰石は吸収塔スラリー中の $CaCO_3$ 濃度を検知して供給され，吸収塔循環流量を直接制御して出口 SO_2 濃度を安定化する．
Control method of desulfurization efficiency suitable for single loop process



8(a) スート分離方式脱硫（除じん＋吸収塔）



8(b) 高性能システム対応のスート混合方式吸収塔

図8　スート分離方式脱硫(除じん塔＋吸収塔)と高性能システム対応のスート混合方式吸収塔　(a)吸収塔の前に除じん塔を設置するスート分離方式脱硫．吸収塔で高純度の石こうを副生する．(b)一塔式並流グリッド塔の上部にスプレーを追加し，除じん及び脱硫性能を向上させた．
(a) Dual-loop type FGD system (quencher＋absorber) (b) Single loop type absorber for high efficiency flue gas treatment system

GGH については，熱回収器を乾式 EP の前流に設置するため，10～20 g/m³N の高ばいじん濃度下で熱交換を行うがこれによって SO_3 による腐食は大幅に緩和された．一方，高ばいじん濃度下において懸念される詰まりの対策としては，SSCS を従来より強化し，伝熱管への付着灰の除去能力を向上させること及び伝熱管の仕様変更で十分に解決できることが判明した．また灰による伝熱管の摩耗対策としては適切な通過ガス流速をとっている．

このように低低温 EP 方式と GGH の高ばいじん濃度仕様（図7）を採用することにより乾式 EP 出口ばいじん濃度として，炭種によっては従来は困難であった脱硫の除じん塔出口と同じ 30 mg/m³N 以下を容易に達成できる．これによって脱硫では石こうの高品質の維持のため必要とした除じん塔は省略できた．ただし，高性能化のニーズを満足するには吸収塔の除じん及び脱硫性能の向上が必要であり，このため上部にスプレーを追加し，除じん塔と同等の除じん性能を有する一塔式の並流グリッド塔を開発した．これによって煙突入口ばいじん濃度 10 mg/m³N 以下及び SO_2 濃度 50 ppm 以下を最終的に仕上げることのできるコンパクトなスート混合方式脱硫を実現した〔図8(a), (b)〕．ただしスート混合方式の採用による排ガス中の HCl や HF による石灰石の活性低下と脱硫制御の不安定に対しては，吸収液中の炭酸カルシウム濃度の制御と可動翼式循環ポンプによる循環流量の直接制御を組合せ，出口 SO_2 濃度を制御することにより対策している（図9）．すなわちスート混合方式でも炭酸カルシウム濃度制御により吸収液の性状と石こう品質が安定し，循環流量制御により最

大限の省エネルギー効果が得られるシステムを実現した．

4．高性能システムの合理化メリット

高性能システムでは除じん塔や湿式EPの省略で設備仕様は大幅に簡素化されて設備費は低減され，しかも設置面積は従来に比べて約20%の低減が可能となった．

また90℃前後の低低温化に伴いIDFの消費動力は約10%少なくなり，従来とほぼ同等のIDFの消費動力で乾式EPの前に設置したGGH熱回収器の排ガス圧損を賄えた．一方脱硫ファンの通風ヘッドは，GGH熱回収器排ガス圧損のIDFによる分担及び除じん塔と湿式EPの省略により低くなり，ファンモータの小型化と脱硫の大幅な消費動力の低減に寄与している．その結果，出口SO_2 50 ppm以下及び出口ばいじん10 mg/m³N以下を達成する脱硫の所内率は従来の1.3%程度から1%以下に低減できた．

スート混合方式では吸収塔でHClやHFが吸収されるが，スラリーのpHが5以上と高いためHClやHFの吸収で1～2以下の低pHとなるスート分離方式の除じん塔に比べて，装置の腐食雰囲気はマイルドとなる．このため本システムでは吸収塔でClやFを従来以上に濃縮することにより系外へのブロー量を少なくでき，これによって排水処理費を低減できた．

またこのような30 mg/m³N以下の低ばいじん濃度に対応するスート混合方式脱硫では，除じんされる灰の量が従来の1/4～1/7以下に低減する．このため排水処理で除去される灰や固形分の量が大幅に減少し，これらをすべて廃棄せずに副生石こうの一部と混ぜてセメント添加用の石こうとして回収することができる．

このように高性能システムでは，電力消費，排水処理及び廃棄物処理費が減り，運転費の大幅な低減が可能となった（表1）．

以上高性能システムは，脱硫，除じん性能を向上し，しかも経済的でコンパクトな排煙処理を可能とした．これによって石炭火力の効率化に大きく貢献できると考える（図10）．

5．あ と が き

環境対策ニーズにより生まれた環境装置や機器が，多くの発電所で運転され，徐々に改善されていく中で，各々の性能や特性及び相互関連が明確となった．そしてこれらを総合的に評価していく中で高性能システムのような最適な総合排煙処理システムとしての概念に発展させることができた．特に高性能システム構築上のキーポイントは，主要構成機器の実機プラントでの特性の把握，実機や実証試験プラントでの気，液，固の各主要成分及び微量成分の全体のマスバランスの定量把握，さらにはシステムの合理化を実現するハードの開発等を達成できたことであった．すなわち総合排煙処理システムを単なる既存構成機器の数珠つなぎとしてではなく，より有機的に関連し合う一体のシステムとしてとらえ，ハードの改善と最適化のための総合エンジニアリングを行うことにより，経済的にコンパクトな高性能システムとして進化させることができたと考える．今後ともこのような手法により全体システムの一層の合理化を図りたい．

表1　高性能システムの経済性の一例
Example of economical improvement of high efficiency flue gas treatment system

項　目	従来システム (20～30mg/m³ N以下)	従来システム＋湿式EP (10 mg/m³ N 以下)	高性能システム (10 mg/m³ N 以下)
設　備　費	やや低廉	ベース	やや低廉
運　転　費	96%	100%	75%
設置スペース	93%	100%	80%

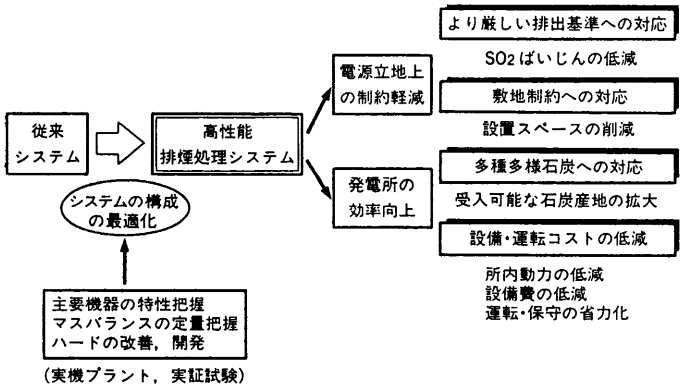


図10　高性能システムによる石炭火力の合理化　最適化された排煙処理システムは，電源立地上の制約を軽減し，発電所の効率向上に寄与する．
Rationalization of coal fired power plant with high efficiency flue gas treatment system

参　考　文　献

(1) Owaki, H., Development of High Efficiency Dust Collecting System in High Performance Flue Gas Cleaning System, JAPAN IERE COUNCIL (Special Document for IERE Members), (January 1992)
(2) Tanaka, T. et al., Development of Advanced Dust Collecting System for Coal-fired Power Plant, 10 th particulate symposium EPRI (April 1993)
(3) 藤島英勝ほか，地球環境時代の石炭火力，火力原子力発電 Vol. 44 No.445 (1993-10)
(4) 清水 拓ほか，湿式石灰石膏法による排煙脱硫技術と実際例，PPM (1993-9)