

サイロ貯炭設備

Large-sized Silos for Coal Storage

環境保全、敷地狭隘対策の面から、サイロ貯炭は有力な方式であるが、ホップの詰まりの危険から実用化が遅れていた。日立製作所は株式会社大林組と共同で、詰まりの生じにくい環状溝形ホップ及びその払い出し装置を新しく開発し、実証プラントで試験を行なった結果、払い出し性能について良好な結果を得た。また、万一詰まりが生じた場合のトラブル解消の手段として、高圧空気噴射式アーチブレーカの効果も確認でき、サイロの実用化の見通しを得ることができた。また、自然発火や爆発などの防災についても、実測及びシミュレーションを行ない、危険性が極めて少ないことを確認した。

木原和彦* Kazuhiko Kihara
木村信夫** Nobuo Kimura
平塚幸哉** Kousai Hiratsuka
末兼正純*** Masazumi Suekane

1 緒 言

石油に代わるエネルギーの活用が叫ばれているなかで、代表的な石油消費産業である電力業界も、石炭火力への移行が具体化している。しかし、我が国の石炭火力発電所の建設は、約10年の中断があり、この間の環境規制面での変化、発電所規模の拡大などを考えると、環境保全対策、敷地狭隘対策、自動化などを織り込んだ揚運貯炭システムを計画する必要がある。日立製作所では、前述のような将来見通しのもとに、揚運貯炭システムの開発に取り組んできた。その一つであるサイロ貯炭方式は、炭塵飛散や雨水による汚水などの環境問題、貯炭場面積及び運転自動化の点で、従来の屋外貯炭方式よりも有利な特長をもっており、今後の有力な貯炭方式の一つと考えられる。反面、サイロはホップ出口での石炭の閉そくが最大の問題である。既存の大形貯炭用サイロは、米国に150基以上あり¹⁾、図1にその一例を示すように発電所、炭鉱及び製鉄所を中心に実用化されているが、長期間の貯蔵実績は少ない。したがって、日立製作所と株式会社大林組の共同研究で流動性の良い環状溝形ホップ構造、及びその払い出し装置を開発し、図2に示す試験サイロで払い出し性能の確認と、万一閉そくした場合の解消装置の効果確認を行ない、石炭用大形サイロの実用化の見通しを得た。



図1 発電所に設置されているサイロ 米国石炭火力発電所に設置されているサイロの一例を示すもので、容量は1基当たり15,000sh tnである。

2 大形サイロの構造

今回開発した新形貯炭用サイロは、閉そくを防止するため次のような特徴をもっている。すなわち、ホップは図3に示すように、従来の円錐形ホップを輪切りにし、下側半分を逆さにしてホップの下部に配置し、ホップとコーンの間に環状のすき間を設け、このすき間から石炭の払い出しを行なう環状溝形構造である。本構造は、閉そく防止を目的としたもので、従来の円錐形ホップでは、粉体の流出時には4方向の絞りを受けるのに対し、この環状溝形構造では2方向の絞りに

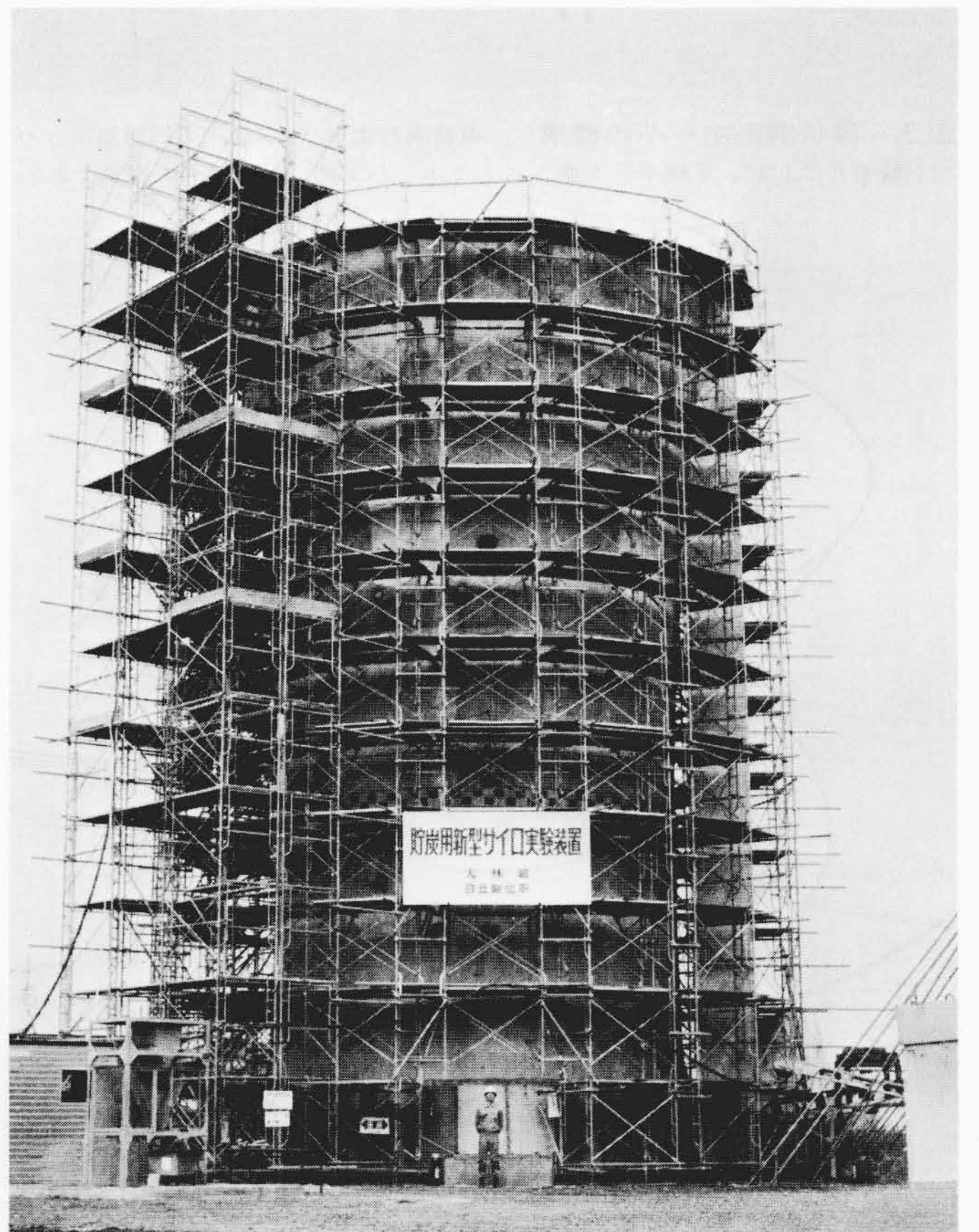


図2 試験サイロ 下部径9.1m、高さ19.5m、容量320tの試験サイロで、石炭はサイロ右側のバケットエレベーターを経て、サイロ上部から充填される。

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所 *** 株式会社大林組東京本社

なっていること、滑り面が凹面と凸面の組合せで力のバランスが崩れることなどにより、アーチがかかりにくい構造である。また、本構造は従来の円錐形ホッパに比べて容積効率も良く、サイロの寸法を小形化できるため、経済性の面でも有利である。

石炭の払い出しは、上記の環状溝形ホッパに付属する払い出し装置により行なわれる。図4は払い出し装置の構造を示したもので、矢印方向に回転する回転スクレーパ、回転スクレーパの下部に位置し、回転スクレーパと逆方向に回る回転テーブル、回転テーブル上の石炭をコンベヤに移す固定スクレーパ及び払い出しコンベヤにより構成されている。

サイロ内の石炭は、ゲートを上方にスライドさせて開くと、環状のすき間から流出し固定テーブル上へ停留する。この場合、固定テーブルと停留した石炭の斜面との角は安息角となる。停留した石炭は、回転スクレーパにより下部の回転テ-

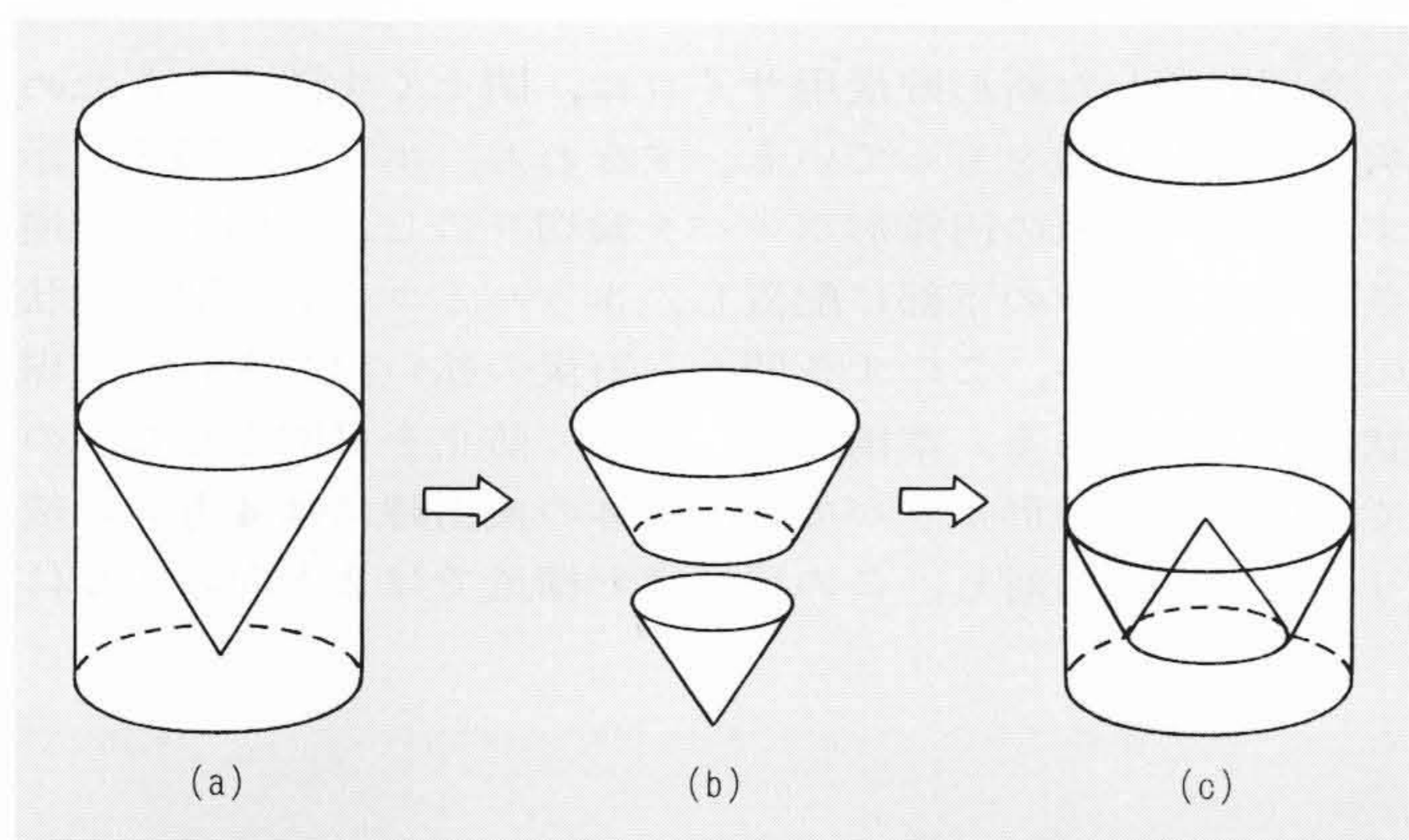


図3 環状溝形ホッパの機構 環状溝形ホッパは、従来の円錐形ホッパ(a)を輪切りにし(b)、下側半分を逆さにしてホッパ下部に配設(c)した構造である。

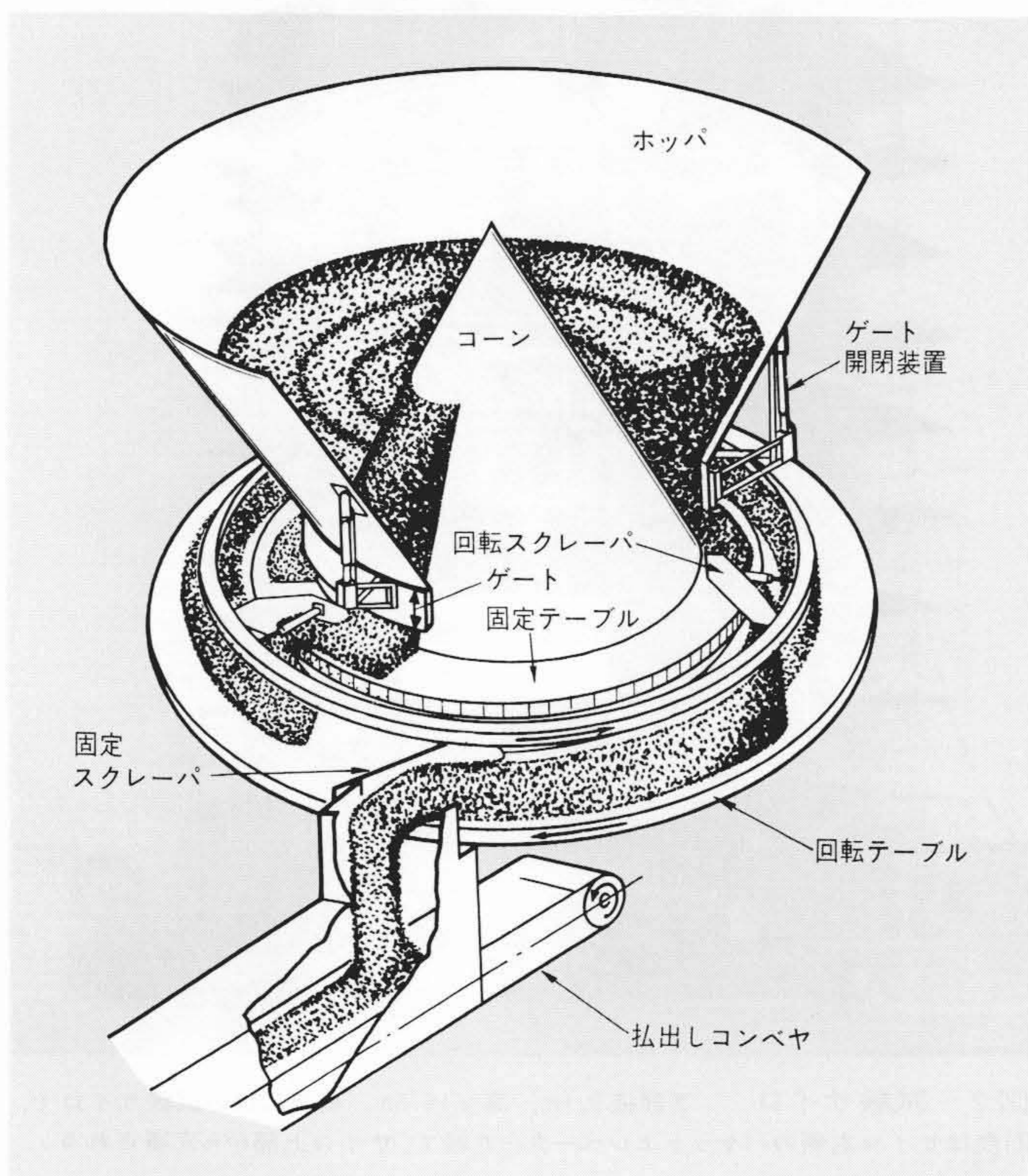


図4 払い出し装置の構造 環状溝形ホッパに付属する払い出し装置で、払い出し速度は、ゲートの高さ、回転スクレーパの回転数により容易に制御することができる。

ブルへ払い出される。このように、回転スクレーパ及びテーブルの運転により、石炭の連続的払い出しが可能である。実機では、ホッパは複数個設けてあり、払い出し量は、払い出しに使うホッパの個数、ゲートの高さ及び回転スクレーパの回転数により容易に制御することができる。

以上述べたように、新形貯炭用サイロは従来のサイロに比べ、極めて閉そくしにくい構造になっているが、万一の閉そくに対処するため、高圧空気の噴射による閉そく解消装置(ラドコシステム)を設けている。本装置は米国で開発され、約15年の実績をもつ装置で、サイロ内の各種のトラブルを図5に示すように解消する。

3 実験装置及び実験方法

サイロの閉そくに関しては、これまで適正なサイロの形状、閉そく解消対策について、実験及び理論が発表されているが、

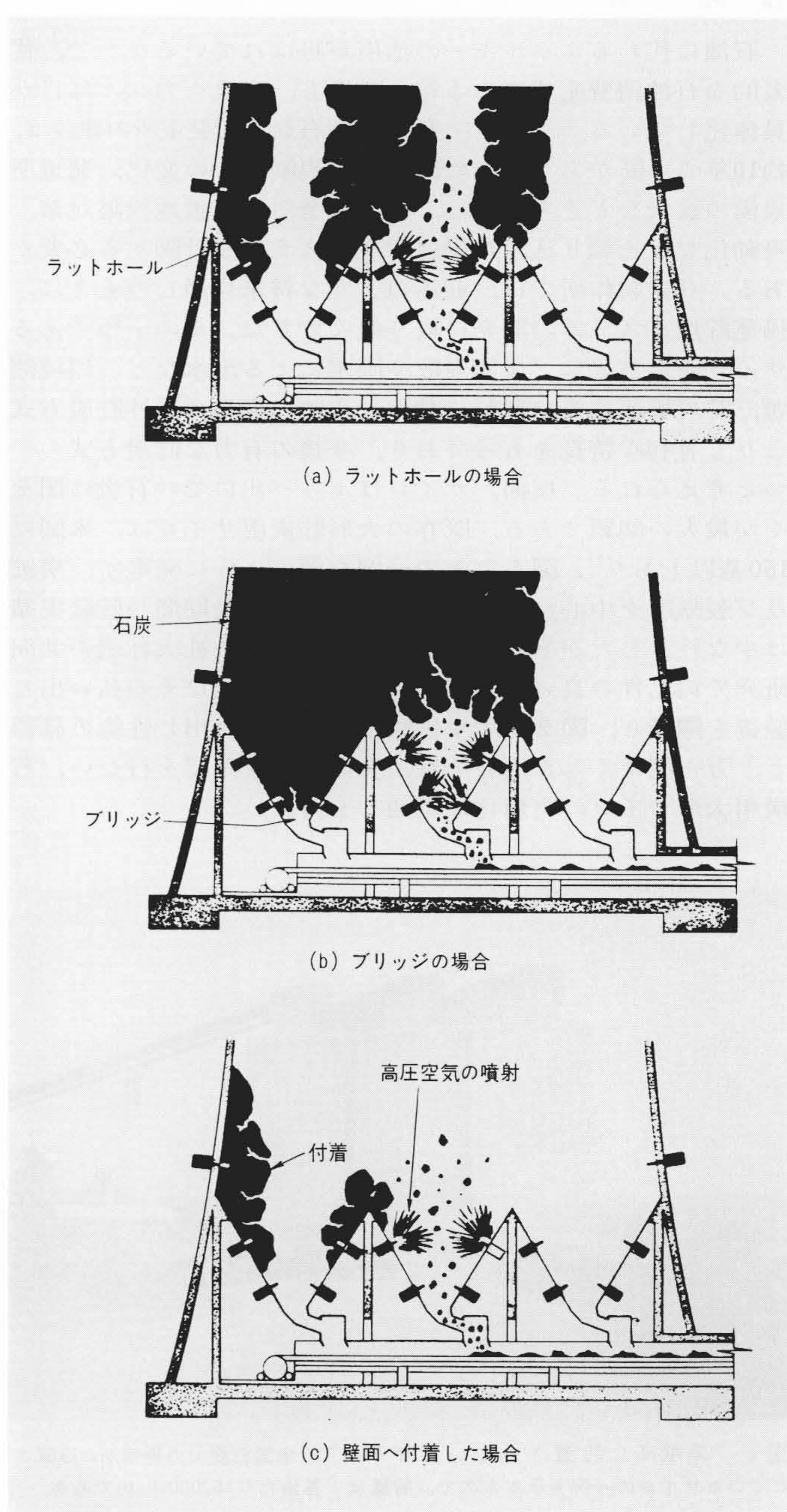


図5 ラドコシステムによるトラブルの解消 ラドコシステムは、衝撃のエネルギーが大きく、効果的なシューティングによりホッパ周りの閉そくなど、トラブルを解消することができる。

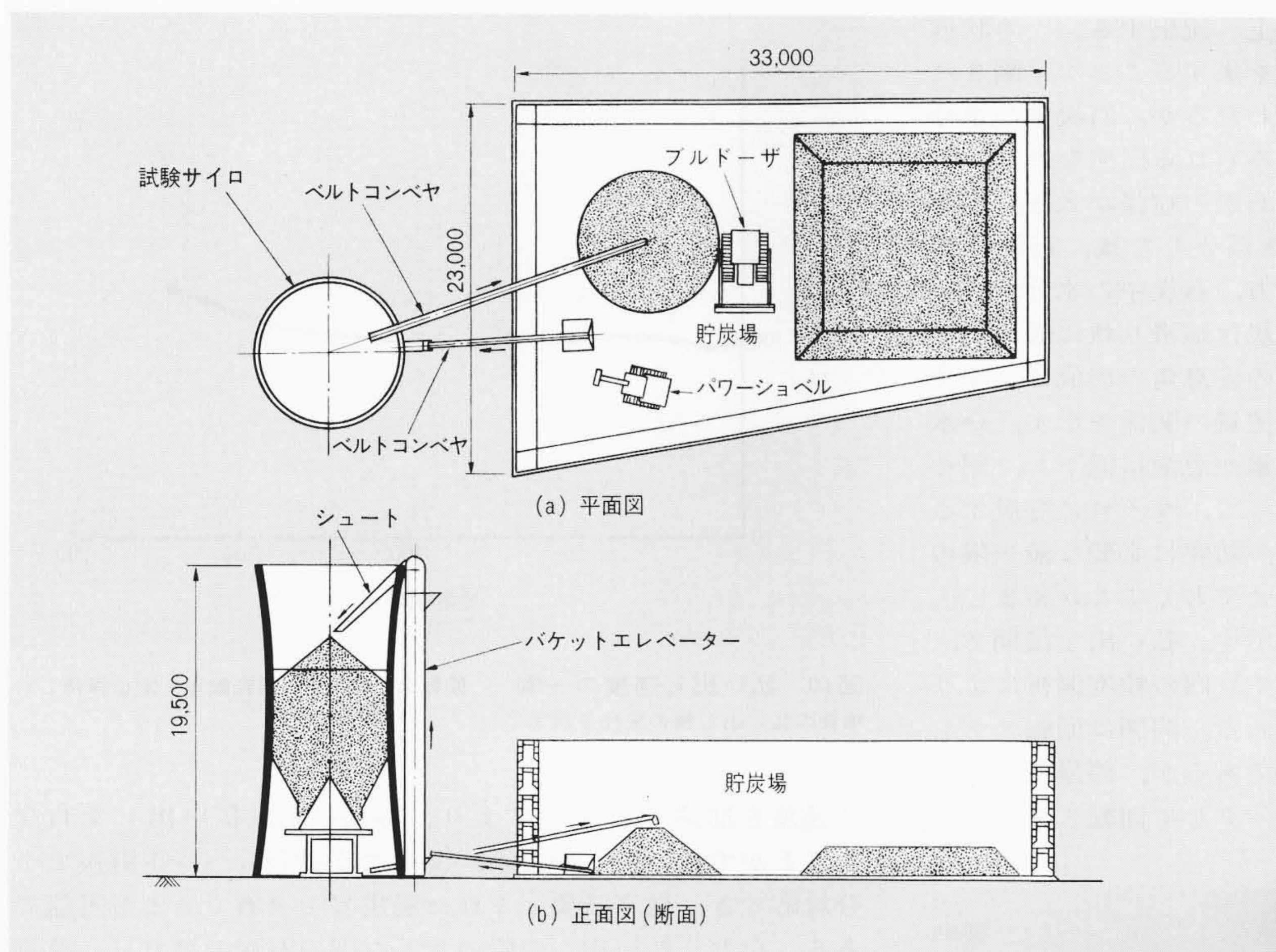


図6 試験場のレイアウト

試験場は試験サイロと貯炭場から成り、貯炭場の石炭はサイロへ充填された後、再びベルトコンベヤで貯炭場へ送られる。

サイロの規模も小さく、貯蔵物も異なるため、大形貯炭用サイロの閉そくを評価することは困難である。一方、近年、貯槽内の閉そくに関し、粉体力学的なアプローチ²⁾が試みられているが、なお今後の研究に待つところが多い。日立製作所ではこのような状況から、小形、中形のサイロモデルで予備試験を行なった後、株式会社大林組技術研究所に、図6に示

す大形試験サイロと貯炭場を設けて、各種の払い出し実験を行なった。本試験装置は、実機とほぼ同寸法の払い出し装置、及び高圧空気噴射装置を備えている。

試験は、石炭中の水分、充填方法、貯炭期間などを種々変えた場合の払い出しの状況、粉体圧、筒体及びホップの応力、炭塵濃度、発生ガス濃度、石炭の昇温測定などを行なった。このうち、充填方法はサイロ上部のシュートから石炭を自由落下させて充填した場合(以下、自然積付と呼ぶ。)と、実機の石炭層の層高での粉体圧で締め固められた場合の払い出しの状況を再現するため、パイロットやバイプロランマで締め固めながら充填した場合(以下、圧密積付と呼ぶ。)の二とおりについて行なった。圧密積付時の状況を図7に示す。

4 実験結果

実験に使用したハンターバレー炭(オーストラリア産)の物性値測定結果を、表1に示す。

4.1 払い出し性能

(1) 自然積付の場合

ゲートを上方にスライドさせて開口すると、ホップ内部の

表1 供試炭分析値 供試炭はハンターバレー炭(オーストラリア産)で、今後我が国でも使用が予定されている炭種である。

	項	目	分	析	値
工業分析(%)	水	分	4.5		
	灰	分	10.4		
	揮	発	32.4		
	固	定	炭	素	52.7
元素分析(%)	灰	分	10.9		
	炭	素	74.0		
	水	素	4.7		
	窒	素	0.7		
	酸	素	8.3		
	全	硫	黄	0.47	
発			熱	量(cal/g)	6,430
ハ			ード	グループ	51

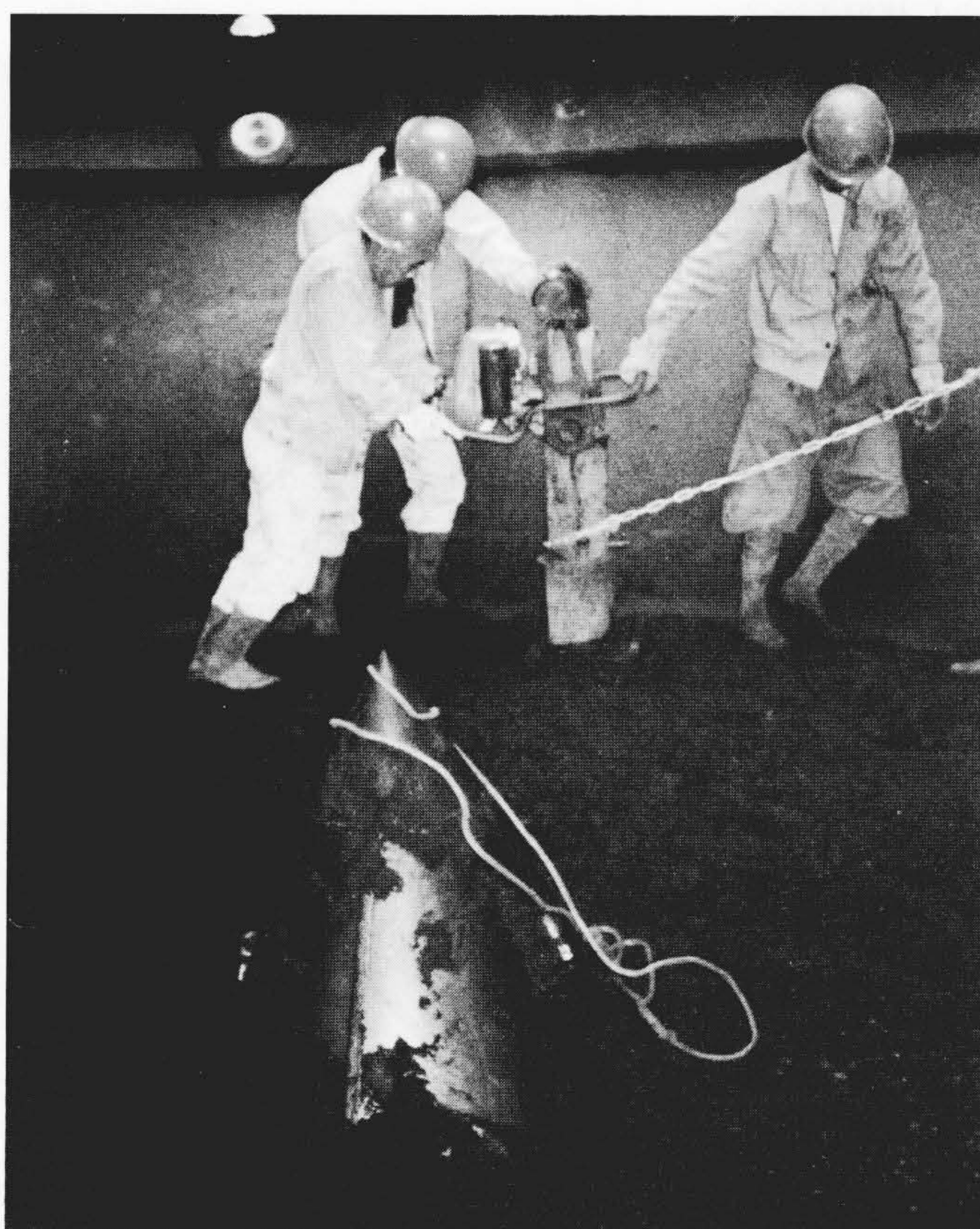


図7 圧密積付の状況 圧密積付は、一定量の石炭を充填した後、バイプロランマあるいはパイロットを用いて、締め固め作業を行なう。

石炭は徐々に崩れて、固定テーブル上へ流出する。この状態から払い出しを開始すると、閉そくを生ずることなく図8に示すように連続的に払い出しが行なわれるが、石炭中の水分などの条件により、次のような差がみられる。すなわち、石炭中の水分が少ない場合、あるいは石炭の粒径が大きい場合には、回転スクレーパの羽根で掻き落とした後、石炭は速やかに、かつ安定して流出する。一方、石炭中の水分が多い場合や粉状の石炭が多い場合は、石炭は地滑り状に緩やかに流出し、石炭表面と固定テーブル面の安息角の形成は、やや不安定な場合がある。図9に水分と流量の関係を示す。全水分で12%(表面水分で約8%)から流量が急激に低下し、閉そくに至る傾向を示している。したがって、サイロに貯炭する場合には、陸揚げ及び運炭装置などの防塵に必要な最少限の水分(表面水分で6~7%以下)に抑えておくことが望ましい。

図10に払い出し量の変化の一例を示す。払い出し後期で、払い出し量が増加しているのは、サイロ内の粒度偏析により塊状の石炭が多くなっているためである。同図は回転スクレーパの回転数を一定に保持した場合であるが、秤量機で払い出し量を検知し、これをフィードバックして回転スクレーパ



図8 払い出しの状況 固定テーブル上へ流出した石炭は、回転スクレーパにより下側へ払い落とされる。

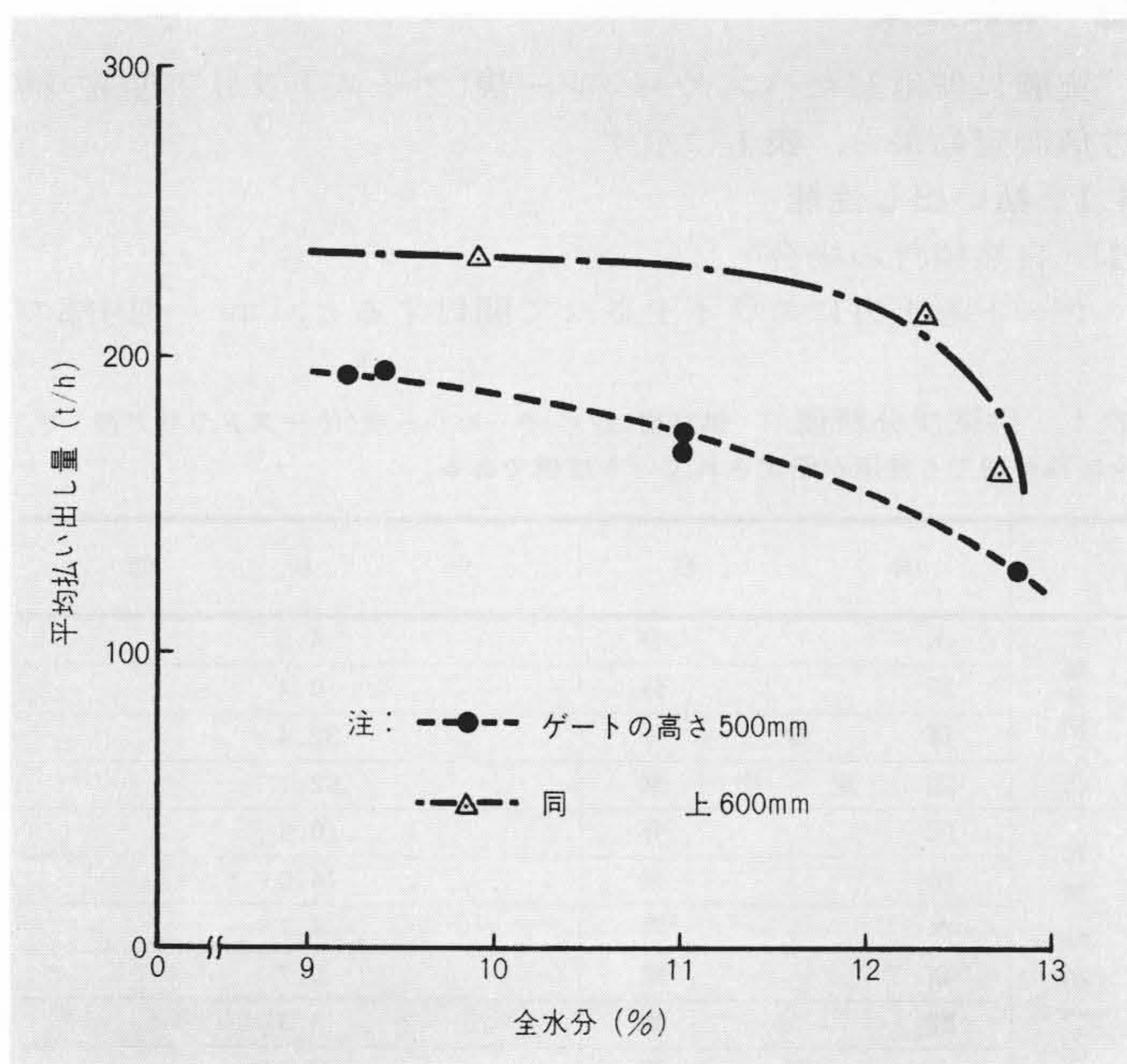


図9 全水分と平均払い出し量の関係 全水分12%以上では、石炭の流動性が急激に悪くなるのが分かる。

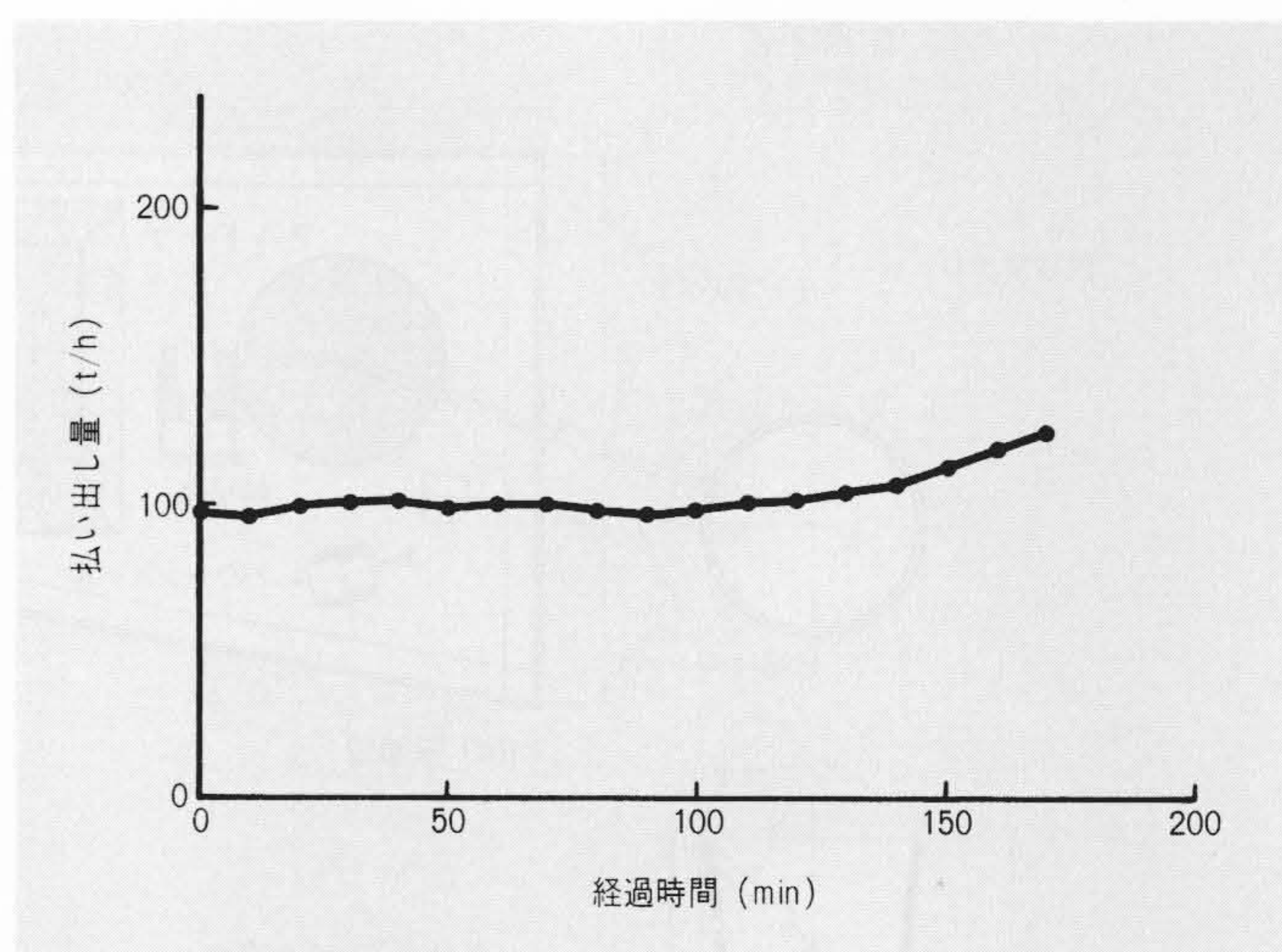


図10 払い出し速度の一例 回転スクレーパの回転数を一定に保持した場合の払い出し量の変化を示す。

の速度を加減することにより、容易に定量払い出しを行なうことができる。このため、混炭する場合もベルト混炭で十分対応でき、従来必要とされた混炭ピンを省くことも可能である。なお、払い出しの際のサイロ内の石炭の流れに、ラットホールなどの現象は認められなかった。

(2) 圧密積付の場合

貯炭期間が短い場合は、自然積付の場合と同様に閉そくの傾向は見られず、払い出しは連続的に行なわれる。貯炭期間が2週間程度になると閉そくは生じないが、貯炭期間が短い場合にはみられなかった筒体壁面への付着がみられる。しかし、この付着も払い出しの進行により、徐々に離れ、脱落し、払い出しの後期では、貯炭期間の短い場合と同様の払い出し状況となる。

貯炭期間が2箇月程度になると石炭粒子間の固結が進行し、払い出しの初期で、ホッパからの石炭の流出が不安定になることが観察された。しかし、このような現象も高圧空気の噴射により解消することが可能となった。

長期貯炭の場合は、炭種又は付着水分の状態によっては、閉そくの可能性は皆無とはいえないが、今回の試験で高圧空気噴射による破碎能力の試験も行ない、噴射口を中心として約2m半径の範囲でアーチを崩す能力をもっており、万一閉そくした場合でも、十分解消できることを確認している。

4.2 サイロ内の粒体圧

サイロに石炭を充填した直後の静置状態での粉体圧、及び払い出し時の粉体圧を測定し、サイロ内石炭の挙動を推測した。その結果、ゲートを開口する前の静置した状態での粉体圧は、ばらつきはあるものの、綱川らの提案したインサートをもつホッパの式³⁾で推定できることが明らかとなった。

一方、ゲートを開口した状態及び払い出し時の粉体圧は、次に述べるような特徴をもつことが明らかになった。すなわち、ゲートを開口して固定テーブル上へ石炭が流出すると、図11(d)に示すように、コーン上方の石炭が密な状態となり、一時的にアーチが形成される。これに応じてホッパ下部は粗な状態となり、荷重分担がホッパの上部へ移行する。その後、払い出しを開始するとホッパ上部と下部で粗密の差が大きくなり、ホッパ上部の石炭の崩壊強度が、増加した荷重に抗しきれなくなり、アーチが崩壊し、粉体圧の分布は再び図11(a)の状態にもどる。払い出しの過程では、このように粗密の状態が繰り返されている。日立製作所では、このような特異な

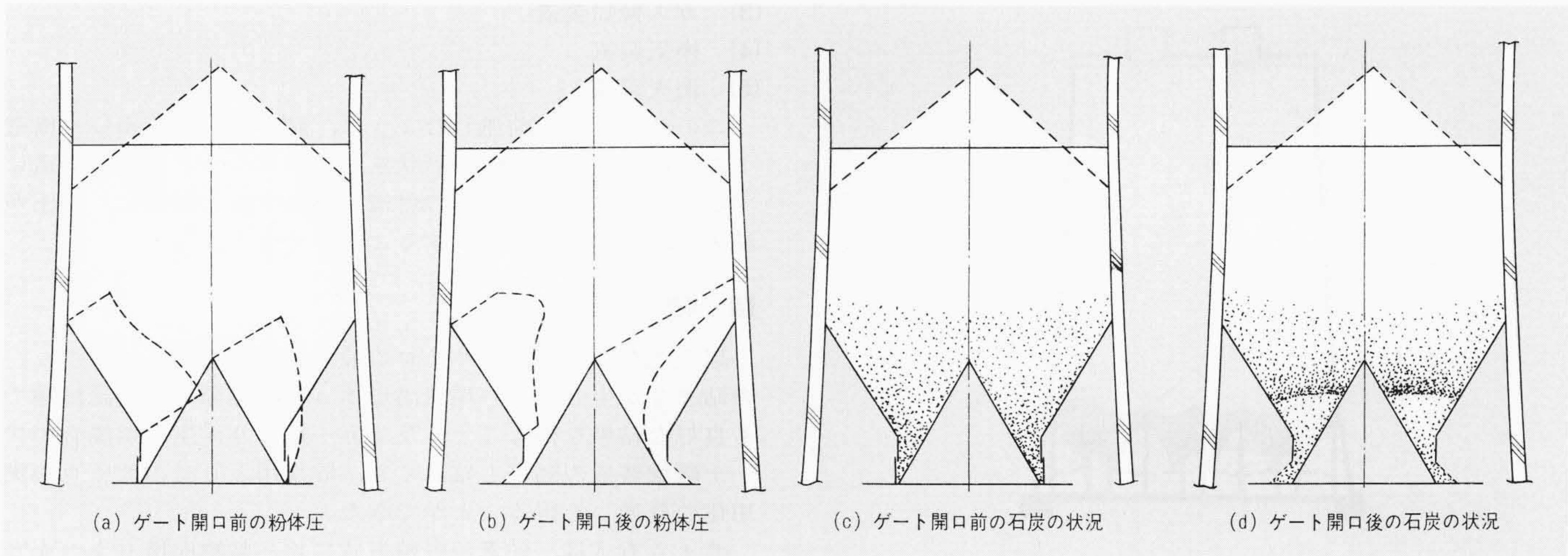


図11 粉体圧の分布と石炭の状況 粉体圧は、壁面に垂直方向の粉体圧を示す。

粉体圧の履歴を受ける貯炭用サイロの閉そく予知技術、及び長期貯炭時の固結強度の経時変化を含んだ閉そくの評価法について、検討を行なっている。

4.3 サイロ内石炭層の昇温

自然発火は、石炭の酸化による反応熱が蓄積されて昇温しついに発火に至るもので、サイロに2箇月間貯炭した場合の石炭の昇温状況を、100点の熱電対により実測した。測定結果の一部を図12に示す。

壁面から0.4m入った部分では、外気温に追従した温度変化を示すが、1m以上石炭層内部に入った点では、外気温の影響は受けず、時間とともに昇温し、2箇月間で約3℃の温度上昇となり、日立製作所で開発した昇温シミュレーション結果ともほぼ一致している。本測定は冬季に行ない、初期石炭温度が2.5℃と低いため昇温速度も低いですが、夏季を想定して初期石炭温度及び外気温を30℃として、2箇月貯炭後の昇温シミュレーション結果は約15℃の温度上昇となる。したがって、供試炭と同程度の酸化反応速度をもつ石炭の場合は、2箇月貯炭でも自然発火の危険はないと推定される。

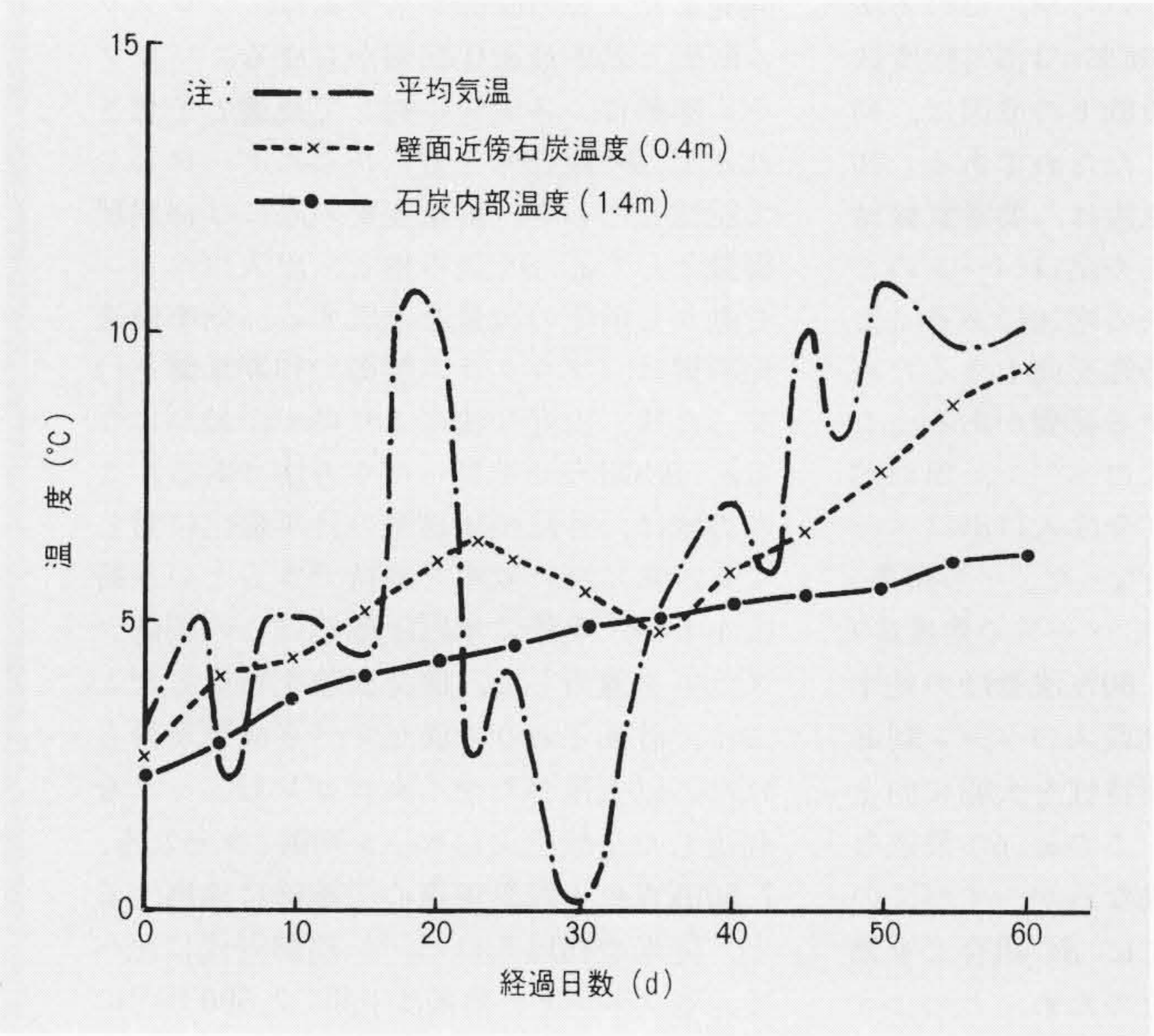


図12 石炭層内の昇温測定結果 石炭層内部は酸化熱により昇温しているが、2箇月程度の貯炭では自然発火の危険は少ない。

4.4 石炭層からの発生ガス

サイロ内に長期貯炭した場合の発生ガス分析結果を、表2に示す。同表中A点はホッパ下部の石炭層内部の、B点は上表面から約1.4m入った石炭層内部の測定値である。各点とも、酸素が減少した分だけ窒素が増加しており、酸素濃度の減少は、石炭投入後1～2日で飽和している。なお、メタンなどの発生ガスは微量である。

サイロ内空間部での発生ガスは、計測器で検出できない程度の濃度で、メタンと空気の混合気体の爆発限界濃度(メタン濃度5%)に比べて微量で、ガス爆発の危険性は極めて低いと推定される。

5 実プラントへの適用

このたび開発した環状溝形ホッパ、及び払い出し装置を適用したサイロの形状を図13に、その基本寸法を表3に示す。ホッパ数は、容量1万t以上の場合には複数個のホッパを配置するほうが容積効率も良く、経済的である。また、円滑な運用及び防災対策として、次に述べるような付属設備を設けておくことが望ましい。

- (1) 詰まり解消用設備
- (2) 温度検知装置

表2 発生ガス分析結果 日数は石炭投入からの経過日数を示す。発生ガスは微量であり、ガス爆発の心配はない。

ガス成分	日数位置	5日目	30日目	60日目
O ₂	A	17.1	16.7	14.7
	B	17.9	16.7	17.5
N ₂	A	82.9	82.5	84.6
	B	81.7	82.7	82.4
CO	A	<0.0005	同左	同左
	B	<0.0005	同左	同左
CH ₄	A	<0.01	0.008	0.008
	B	<0.01	0.015	0.004
CO ₂	A	0.12	0.11	0.08
	B	0.06	0.10	0.07

注：単位(vol.%)

表3 サイロ寸法 図13のサイロ形状のD、H寸法を示す。

項目	容量(t)				
	7,000	13,000	30,000	60,000	100,000
ホッパ数(個)	1	4	7	7	7
下部直径D(m)	24	30	35	55	70
高さH(m)	40	45	50	65	70

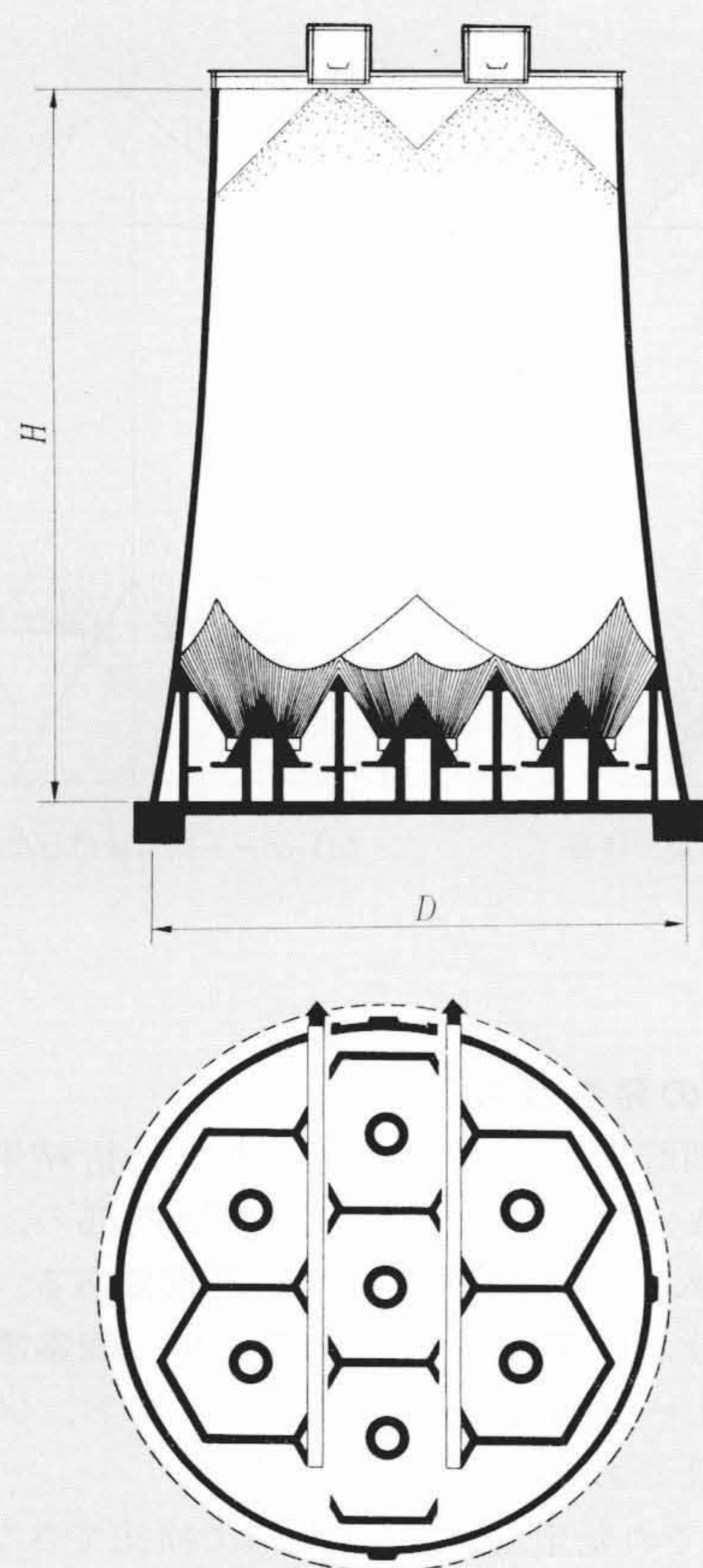


図13 サイロ形状 平面図はホッパが7個設けられた場合の配置を示す。

- (3) ガス検知装置
- (4) 換気装置
- (5) 消火設備

このサイロは、前述したように、詰まりにくいホッパ構造とともに、サイロ筒体の形状をハイパボリックシェル構造にすることにより、壁面への付着を防止すると同時に、内圧が減少し、筒体壁厚を薄くすることができる。

6 結 言

以上述べたように、サイロの最大の問題点であったホッパの詰まりが生じにくい環状溝形ホッパを開発し、実証試験でも良好な結果を得たこと、及び万一詰まりが生じた場合のアーチ破壊装置の効果も確認でき、貯炭用としてのサイロの実用化の見通しを得ることができた。

サイロ方式は、従来の野積方式に比べ敷地面積も $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ となり⁴⁾、我が国のように敷地面積が十分にとれない立地条件の場合には有力な貯炭方式として利用されると思われる。今後も、経済性を含めより良いサイロシステムの完成を目指して努力してゆく考えであり、関係各位の御指導をお願いする次第である。

参考文献

- 1) Coal Technology '79 Conference Papers Vol.1 (1979-11)
- 2) Jenike, A.W., et al.: Bin Loads IV, Trans. A.S.M.E., J. of Eng. for Ind., 95, B-1, 13 (1973)
- 3) 綱川, 外: インサートによるホッパの閉塞防止, 粉体工学会誌, 15, 10, 594~601 (1978-10)
- 4) 木原, 外: 石炭火力発電所用揚運貯炭システム, 日立評論, 60, 4, 291~296 (昭55-4)

論文抄録

遠心圧縮機のベーンコントロール

日立製作所 刑部一郎・西田秀夫・中野善之
日本機械学会誌 83, 745, 1522—1527 (昭55-12)

産業界の多くの分野で使用されている遠心圧縮機は、通常、設計点で効率が最高になるように設計されるが、常時、設計点で運転されることはまれである。近年、エネルギー価格の高騰のため、省エネルギーの観点から設計点ばかりでなく部分負荷時の効率向上も強く望まれ、流量制御法が見直されてきた。

流量制御法には回転数制御や絞り制御などがあるが、プラント抵抗の流量に対する変化が小さい場合には絞り制御を行なうのが一般的である。なかでも、ベーンコントロール法は比較的負荷時の効率が高いためよく使用される。ベーンコントロール法には、入口ベーン制御と出口ベーン制御がある。入口ベーン制御は、入口ベーンにより羽根車入口の流れに予旋回を与えて、羽根車の理論仕事量を変える方法である。また、出口ベーン制御は、出口ベーンの角度を変えて損失を増減することにより、圧縮機特性を変化させ流量制御を行なう。従来は、多段圧縮機の初段の入口ベーンだけ

を用いて、流量制御(以下、初段入口ベーン制御という。)を行なっていたが、この方法では、80%流量時に等温効率が3.5%程度低下する。この等温効率の低下の原因は、初段の効率が大幅に低下したためである。初段の効率低下が大きい原因は、要素試験結果から入口ベーンの損失や出口ベーンのミスマッチングによる損失の増加にあることが判明した。部分負荷特性を向上するためには、この損失を低減する必要がある。ここでは、圧縮機全段の入口ベーン、出口ベーンを動かす流量制御法(全段入口出口ベーン制御)について検討を行なった。その結果、入口ベーンの角度 α と出口ベーンの角度 β の組合せを最適にすると、80%流量時の効率低下量は0.5%となり、初段入口ベーン制御の場合に比べて部分負荷特性を大幅に向上できることが分かった。この α , β の最適な組合せは圧縮機ごとに異なるが、すべての圧縮機に対して前もって α , β の組合せを知ることが困難である。そのため、どのような場合にも対応できるマイクロコンピュー

タを利用した出入口ベーン制御システムを開発した。この制御システムは、プログラム制御と効率最適化制御から成る。プログラム制御は、各流量に対して最適と予想される α , β の組合せをあらかじめデータとして記憶しておき、流量変更の際には初期制御量として α , β を読み出し、出入口ベーンを動かし所定の流量を達成する。効率最適化制御は、プログラム制御で初期制御を行なった後、山登り法により効率が最高になる α , β の組合せを見いだす方法である。この方式は、外乱や圧縮機の経年変化に対しても、常に高い効率を維持できるという特長をもつ。実際に単段圧縮機にこの制御システムを適用して、確認試験を行なったところ、計画どおりの満足すべき成果が得られた。以上述べたマイクロコンピュータを利用した全段出入口ベーン制御システムを、7,500kWの4段等温遠心圧縮機に適用すると、従来の初段入口ベーン制御方式に比べて、省エネルギー効果は年間で2,500万円になる。