



空気カプセル輸送システム

久光 脩 文*

1. はじめに

工業用原材料，食料品，都市廃棄物など固形物の輸送には自動車をもっとも広く用いられているが，道路交通の渋滞や振動・騒音・粉塵飛散などの公害が顕在化している．この問題の解決策の一つとして，空気輸送・スラリー輸送・空気カプセル輸送・水カプセル輸送などのパイプラインを用いた輸送手段が経済性・無公害性の面から脚光を浴び，広い分野でその採用が検討されている．

ここでは，これらのうちの，被輸送物を車輪付カプセルに積載し，管内を気流にのせて輸送する空気カプセル輸送について，まず，その特徴および歴史的展開を述べ，つづいて，システムの概要と制御法に言及し，最後に，具体例として，最近完成したセメント会社の石灰石輸送システムを紹介する．

2. 空気カプセル輸送の特徴と適用領域

空気カプセル輸送は，パイプライン輸送の一般的な特徴のほかに，

- (1) 管内気流が 1 kg/cm^2 以下の低圧であるため，万一事故などで管路が破損しても全く問題ない．
 - (2) ゴム車輪を用いるため，管材の摩耗がほとんどなく，耐用年数が長い．
 - (3) 粉粒体・塊状体はもちろん，都市廃棄物や工業半製品・一般消費財など多様な物資を輸送できる．
 - (4) 多品種輸送や多点間輸送など高度な輸送形態への適用も可能である．
- など多くの長所を有している．他方，短所としては，
- (1) システム建設の初期投資額が大きい．

- (2) 計画した輸送量がないと輸送コストが増加する．
- (3) 曲線路の曲率半径は，管径の3倍程度の長さのカプセルが通過できるよう，管径の40倍以上が必要である．
- (4) 最大傾斜角は 10° 以下が一般的であり，

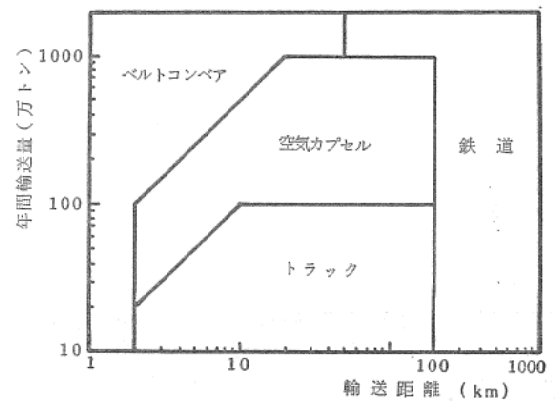


図1 各種輸送法の適用分野

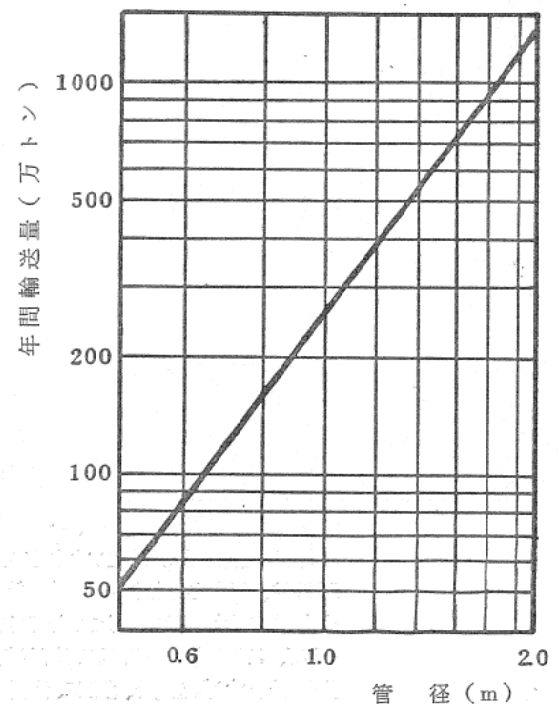


図2 輸送能力

*久光脩文 (Nobuyoshi HISAMITSU)，住友金属工業株式会社，中央技術研究所，企画調査室，次長，工学博士，機械工学

急傾斜のルートはとれない。
 (5) 輸送量・輸送経路などの変更が困難である。
 などがあ、プロジェクトの計画・システム設計にあたっては、
 (1) 輸送量・輸送経路などの慎重な設定。
 (2) 輸送物の性状に適合したカプセルの構造、ハンドクリング機構の設計。
 などが必要である。

輸送対象規模は、輸送物や環境条件に左右されるが、図1に示される程度、とくに数kmから数十kmの距離で年間数百万トンの輸送量のもの

が適している。このときの輸送量に見合ったパイプラインの管径は大略図2のごとくである。

3. 歴史的展開

空気カプセル輸送の歴史は、表1に示すように、イギリスの J. Ballance が特許を取得した1824年にさかのぼることができ、1861年にはイギリスで郵便物の輸送ラインも建設されたが、自動車の普及につれて用いられなくなった。その後約100年の空白を置いて再び検討の対象としてとりあげられ、西ドイツの郵便物輸送ラインを皮切りに、ソ連では骨材輸送ラインがあいついで建設され、さらに、1981年中の完

表1 空気カプセル輸送の歴史

○：テストライン，等 ●：実用ライン

年代	イギリス	アメリカ	西ドイツ	ソ連	日本	記 事	ライン諸元		
							年間輸送量	距離	管径
1824	○					J. Ballance 空気カプセル輸送特許取得		45m	2.4m
1861	●					郵便物輸送ライン (ロンドン)	?	0.4km	1.35×1.2m
1956				○		ドニエプルベトルスカ鉱業研究所研究開始			
1964			●			郵便物輸送ライン (ハンブルグ)	2万トン	18,22km	0.45m
1970		○				M. R. Carstens (ジョージア工大) 研究発表			
1971				●		砂利輸送ライン (トビリシ)	60万トン	22km	1.0m
(この頃)		○				チューブエキスプレスシステム社 (アトランタ)		420m	0.4m
1972					○	大福機工, アメリカより技術導入 (日野)		1500m	0.9m
1973					○	住友グループ, ソ連より技術導入			
1976					○	住友金属 (波崎)		1250m	0.3m
	○					BHRA & TRRL (ミルトンキーンズ)		525m	0.6m
				○		ライセンスイントルグ (オレホボズイエボ)		4000m	1.2m
				●		砂利輸送ライン (ボルコラムスク)	300万トン	3km	1.2m
1977					●	生石炭輸送ライン (室蘭)	17万トン	1.5km	0.6m
1978					●	塗料スラッジ輸送ライン (岡崎)	0.15万トン	0.12km	0.6m
1979					●	碎石輸送ライン (バルジャンスカ)	100万トン	5km	1.2m
1980					●	砂利輸送ライン (トビリシ)	200万トン	50km	1.2m
1981					●	石灰石輸送ライン (葛生) 稼動予定	200万トン	3.3km	1.0m
					●	都市廃棄物輸送ライン (レニングラード) 稼動予定	50万トン	12km	1.2m
					●	砂輸送ライン (ボルゴグラード) 稼動予定	300万トン	13km	1.2m
(最近)			○			カールスルーエ大 (カールスルーエ)		240m	0.7m

成をめざして骨材輸送ラインと都市廃棄物輸送ラインが建設中である。わが国では、1977年生石灰の輸送ライン⁹⁾が、翌1978年に塗料スラッジの輸送ライン⁸⁾が建設され、本年夏には石灰石輸送ラインの稼働が予定されている。

4. システムの概要

空気カプセル輸送システムは、通常、図3のごとく「カプセル」「積込ステーション」「荷卸ステーション」「パイプライン」「経路切替装置」「プロアステーション」および「運転制御システム」から構成される。

(1) カプセル

貨物を積載して走行する車両で、図4に見られるごとく、車体の前後に複数個の走行用車輪が装着されている。車輪は通常ソリッドゴムタイヤ付が使用される。管内気流を有効に利用するために、前後の妻板にはパイプ内面とのすき間をできるだけ少なくするための弾性体のシールが円周上に配置されることが多いが、別にシール専用車が連結される場合もある。輸送物の荷崩れを防ぐために、車輪ブロックと本体とがカプセルの中心軸まわりに相対的に回転可能とされることが多い。一般に、輸送効率を高めるために数両連結で運行される。

(2) 積込ステーション

積込方式は、輸送物の性状や前後のハンドリングのプロセスなどに応じて種々のタイプが考えられているが、ホッパ内の輸送物をバッチャで計量し、定量をカプセルに積込むのが基本である。そのあと、カプセルは機械力あるいは空気力によって往路パイプラインに導入され、プロアからの気流により荷卸ステーションに向けて出発する。

(3) 荷卸ステーション

荷卸ステーションに到着したカプセルは、管軸まわりに回転されたり底蓋が開放されたりして輸送物を排出する。空になったカプセルは復路パイプラインに導入され、積込ステーションへ返送される。

(4) パイプライン

積込ステーションと荷卸ステーションとを結ぶカプセルのガイドウェイであり、輸送量が極端に少ない場合を除き複線となる。カプセルの車輪は通常ゴムタイヤで管の摩耗の心配がなく、管内気流の圧力も低いので、薄肉の鋼管で十分であり、コンクリート管の採用も可能である。曲線路の半径はカプセルの形状寸法によって決まり、管径は輸送量、ルート状況、発車イ

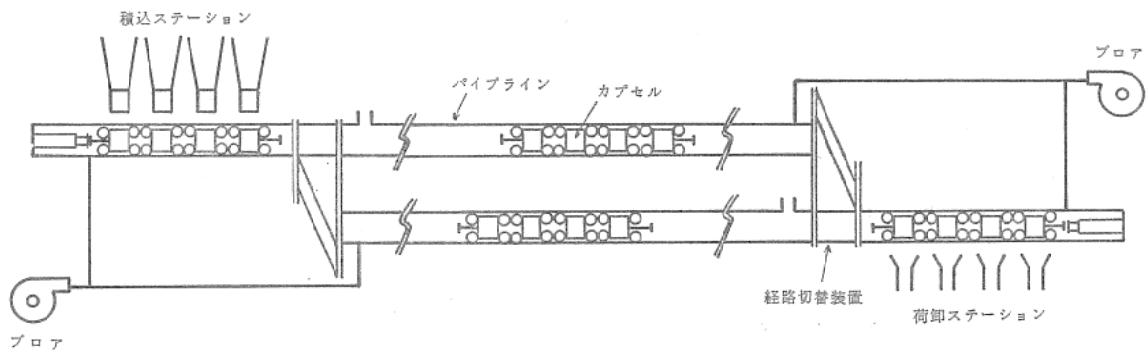


図3 カプセル輸送システム概念図

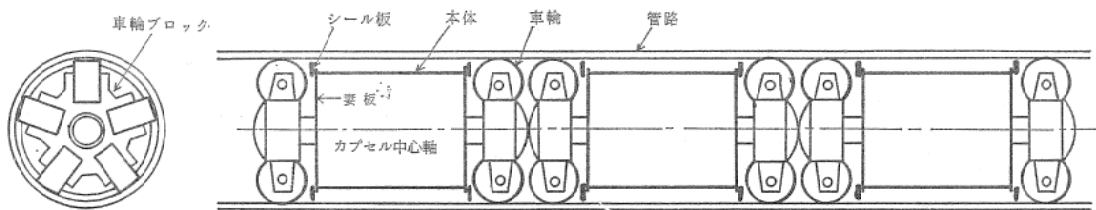


図4 カプセル

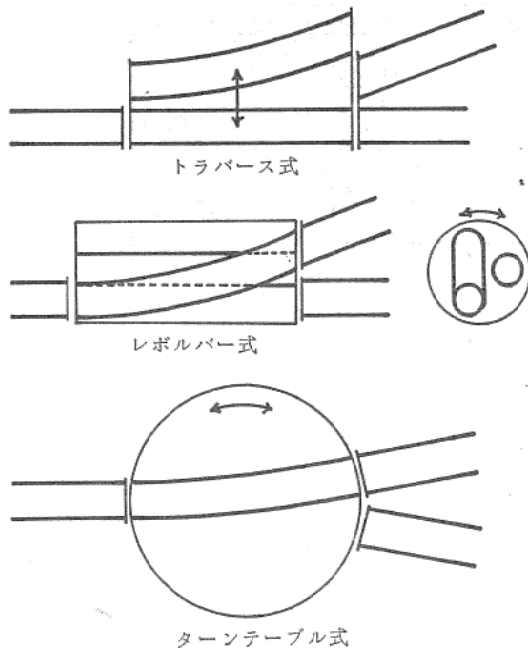


図5 経路切替装置の例

ンターバル，カプセル寸法などを含めた最適化により決定される。ラインの傾斜角は 10° 以下に選ばれるが，傾斜部が短い場合などはこれを超えてもよい。後述のカプセルの走行制御のためのエアバイパス，空気放出口，種々のセンサなどが設けられることもある。

(5) 経路切替装置

カプセルの輸送経路切替装置で，これによりカプセルの多点間輸送も可能となる。迅速な作動，確実なエアシール，コンパクトであることなどが要求され，図5に示すように，種々のタイプが考案されている。

(6) プロアステーション

カプセルを走行させる気流の発生源であるプロアおよびその周辺機器で構成される。カプセル輸送では，カプセルの発車時などにプロアに高負荷が加わる場合が多いので機種選定にあたってはサージング領域の狭いものが望ましい。また，プロアは公害規制の対象となるため，サイレンサや防音建家が用意される。

(7) 運転制御システム

安全確保を目的とした全系での異常の早期検出，諸設備の運転制御，電力管理，および，システム機能管理を目的とした輸送実績の把握，保守履歴の把握などを行う。これらの情報・制御ソフト・操作端などはすべて中央に集約されて

おり，1名のオペレータでも運転が可能である。

5. カプセルの走行制御

カプセルの走行制御には大別して

a. ステーションでのハンドリングを容易にするために，到着したカプセルを所定の位置に停止あるいは所定の速度まで減速させるための制御

b. カプセル特性のバラツキによるカプセル列車の集団化を防止するための間隔制御

c. 全ラインに亘って，カプセルの速度変動をできるだけ少なくするための速度制御がある。システムの計画・設計にあたっては，カプセルの走行をきめ細かに制御する考え方と，制御を最小限に抑えてカプセルや各種器機個々の性能に負わせる方法とがある。

(1) ステーションでの制動法

ステーションでのカプセルの制動には，油圧や空気圧による制動装置にカプセルを衝突させる方法や，カプセルと閉じられた管端との間の空気の圧縮により生じる圧力を利用して制動し，管端に設けられた調節弁の開度調節によって停止位置あるいは到達速度を制御する方法などがとられる。前者はカプセル一列車の輸送量が大きくなると制動装置も大型化し，経済的ではない。

後者には

a. 制動ゾーンの各位置でのカプセル速度や通過時間を予め設定された標準値と比較し，調節弁の開閉を行なう方法

b. 予め測定された到着カプセルの特性により調節弁の開度を決定する方法

がある。オンラインでカプセルの特性が計測できれば，制御性および調節弁の作動頻度の面でbの方法が有利である。図6にこの制御システム構成の例を示す。管径2m，カプセル重量100トンのシステムでのシミュレーションの結果によれば，この制御システムでは停止位置を1m以内の精度で制御可能であり，また，管端への到達速度は最大値を0.8m/s程度に抑えることができる。

(2) 間隔制御

輸送距離が長い場合やカプセルの発車間隔を短くした場合には，カプセル特性のバラツキに

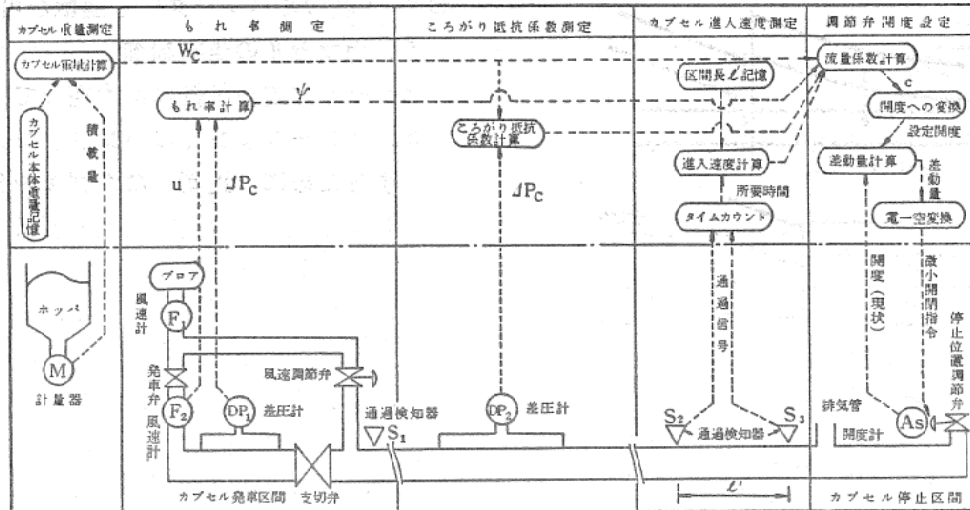


図6 空気力による制動法の一例

より、走行している間に速いカプセルが遅いカプセルに追いつき、カプセルの集団化が起こる。このときの衝突速度は通常 0.5m/s 以下でカプセルの強度面からは問題ないが、システムによってはステーションでのハンドリングの支障となることがある。この対策としては次のような方法が考えられている。

a. 集団化を前提とする場合

- (i) 到着したカプセルを先着カプセルと連結し、連続的にハンドリングを行う。
- (ii) 到着ステーションの手前にカプセル貯留ゾーンを設け、貯留されたカプセルを補助プロアなどで逐一ステーションに送り込んでハンドリングする。

b. 集団化防止の場合

- (i) 先行カプセルの速度や予め測定されたカプセル個々の特性により発車間隔を調節する。
- (ii) カプセルのシール板を可動型にしたり車輪に電磁ブレーキをつけたりして、これらを遠隔操作することによりカプセルの速度を制御する。
- (iii) 想定されるカプセル間隔ごとにカプセルを停止可能なエアバイパスを設け、相隣接するエアバイパス間を2個以上のカプセルが走行しないようにする。

(3) 速度制御

パイプライン内の空気圧は下流ほど圧力損失

のため低下し、これに応じて空気は膨張して風速が大きくなり、カプセル速度が増大する。

5～10kmの区間では、カプセルの到着点での速度は出発点での2倍近くに達することがある。また、下り傾斜ラインを走行するときにもカプセル速度は大きくなる。このようなカプセル速度の増加は、カプセル車とくにその車輪まわりの強度設計を厳しいものとし、タイヤの温度上昇をも招いてタイヤの材質に制限を加えることもある。また、到着時のカプセル速度の増大は、カプセル制動システムの設計にも厳しい条件を与える。この対策として次のような方法で速度を制御することが考えられている。

a. ライン途中500 m～1 kmごとに 空気放出口を設ける。

b. 傾斜区間にバイパスを設け、バイパス中に補助プロアを設ける。このプロアにより、下り傾斜部では下流側から、上り傾斜部では上流側から空気をメインラインに吹込む。

6. 石灰石カプセル輸送システム

本システムは、年間200万トンの石灰石を住友セメント㈱の唐沢鉱山から栃木工場まで輸送するためのカプセル輸送システムであり、住友商事・鹿島建設・新潟鉄工・住友金属の四社が共同で建設にあたったものである。これは、1973年にソ連から導入された技術をもとに、図7に示す内容の研究開発の成果をふまえて計

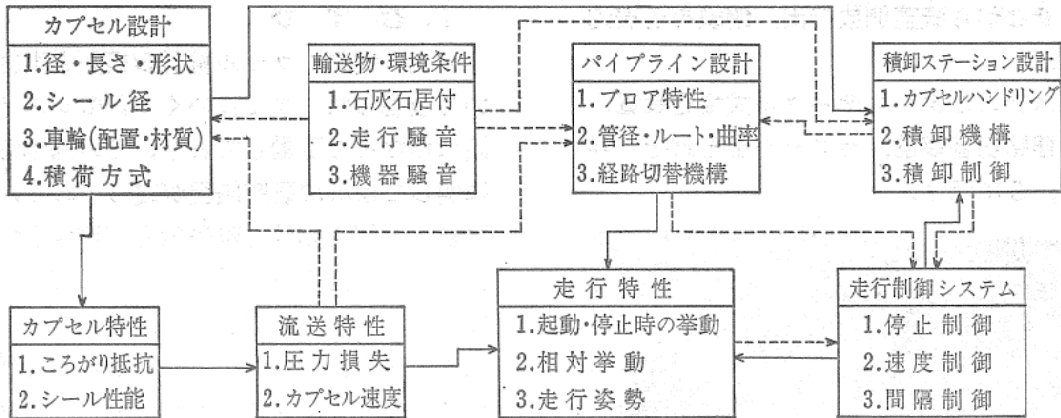


図7 石灰石カプセル輸送システムでの研究、開発項目

表2 システム仕様

項目	仕様
輸送条件	石灰石（みかけ比重1.6） 年間200万トン（6000時間） 3.2km（高低差50m）
パイプライン	内径 998mm（肉厚 9～13mm） 複線 約50%埋設
カプセル	積載量 1.6トン（空車1.6トン） 片側5車輪 3両連結 50秒間隔発車 使用カプセル75両
メインプロア	輸送側：470Nm ³ /min × 0.3kg/cm ² 800kw（平均380kw） 返送側：550Nm ³ /min × 0.45kg/cm ² 840kw（平均480kw）

画・設計されたもので、以下の特長を有する。

- a. 発車間隔を短縮し、列車編成数を増大することなく輸送能力を高めている。
- b. ターンテーブル式の連続荷役装置が用いられている。
- c. 列車と管端との間の空気が圧縮されて生じる圧力を制動力として利用し、弁操作に

よる列車の減速制御を採用し、緩衝器の容量を小さくした。

本システムの仕様を表2に、また、概念図を図8に示す。

ステーション近傍の排気口から管端までを制動ゾーンと称し、制動ゾーン終端すなわち荷役装置入口には常時1～2列車待機している。後続列車は、先に述べた制動方法により、一定速度以下で先行列車に追突し連結される。先頭列車はチェーンコンベアで移動されながら荷役作業を受け、荷役装置出口で連結開放装置により後続列車との連結を解かれ、吸引プロアにより吸引されて発射筒内に導かれる。発射筒は列車を受け入れると他方のパイプライン側にシフトされ、列車の発射後もとに戻される。この連結解除から発射筒の復帰までが発車間隔50秒となり、それぞれのパイプライン中を常時7～8列車走行することになる。

積込ステーションでは、ホッパに貯留された石灰石が、カプセル列車の移動と同期して回転するターンテーブル式積込装置によって一定量ずつカプセルに積込まれる。荷卸装置は、列車

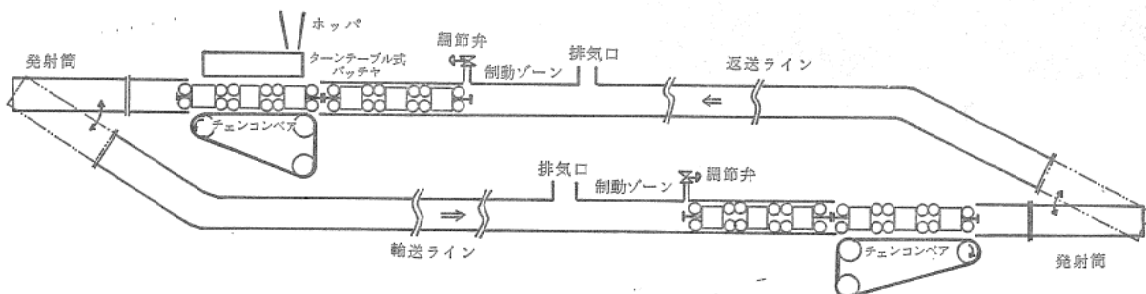


図8 石灰石輸送システム概念図

を移動させながら底蓋開放排出，閉鎖を連続的に行なう。

このシステムのターンテーブル式積込装置，発車筒と経路切替装置，カプセルをそれぞれ写真1，2，3に示す。

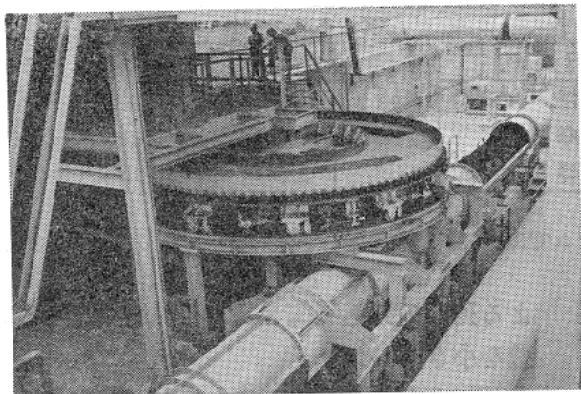


写真1 ターンテーブル式積込装置

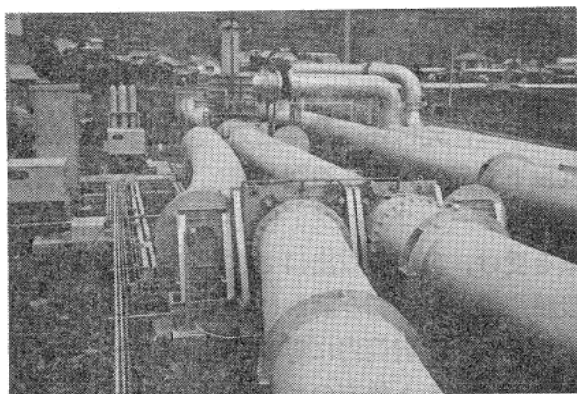


写真2 発車筒（奥）と経路切替装置（手前）

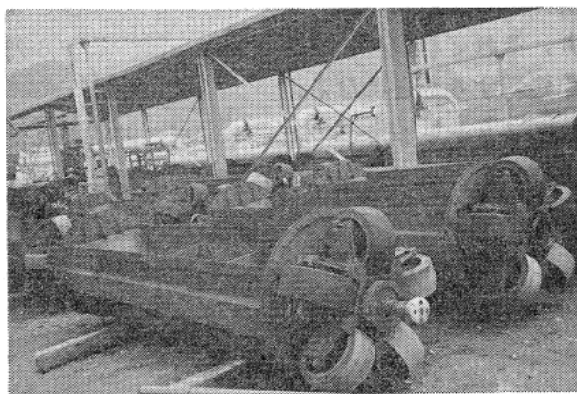


写真3 カプセル

7. むすび

以上，空気カプセル輸送の概要と実施例について概説した．すでにいくつかのシステムが長期にわたって稼働しており，その基本的な技術に関してはほぼ研究開発が終っており，ある程度以上の使用年数と輸送量とが確保されれば，経済的にも他の輸送手段に十分対抗できるものである．カプセル輸送の宿命として輸送物の性状や輸送環境によってハンドリング機構，カプセル形状や制御システムを種々変化させる必要があるが，スラリー輸送やベルトコンベア，空気輸送などに比べて適用範囲が広く，今後とも無公害の省力化された輸送手段として，原材料・廃棄物輸送用に数多くのシステムが建設されるものと予想される．

文 献

- 1) Carstens, M. R. : Hydrotransport 1, paper C4 (1970).
- 2) 福地合一, 磯野 洸, 河内 捷, 四條恒明 & 二階堂徳也 : 鉄道技術研究報告, No. 956(1975).
- 3) Carstens, M. R. & Leva, D. W. : ASME, paper 76-Pet-34 (1976).
- 4) 大滝英征 : 機械技術研究所報, Vol 30, No. 6 (1976).
- 5) Bunce, J. A. : TRRL, paper PA 439 (1978).
- 6) 久光脩文, 小杉佐内, 武石芳明 : 全国地下資源学協会合同秋季大会分科研究会資料, paper E3 (1978).
- 7) 柳井田勝哉 : 同上, paper E4 (1978).
- 8) 三菱重工技報, Vol 15, No.4 (1978).
- 9) 榑原守彦 : 生産と運搬, 4月号 (1979) 75.
- 10) 森川敬信, 辻 裕, 蝶野成臣, 杉本周造 : 機構論 No.790-15 (1979) 257.
- 11) 森川敬信, 辻 裕, 蝶野成臣, 長谷川徹 : 同上 No.800-4 (1980) 41.
- 12) 同上 : 日本機械学会関西支部第55期講演論文集 (1980) 76.