

# パナマ運河向け曳船用機関車 (機関車システム)

## Towing Locomotives for The PANAMA CANAL (I) (Locomotive System)

The Panama Canal was returned to the Republic of Panama from the United States of America at the end of 1999. In order to take the burden of the new era, it was decided to purchase towing locomotives after an interval of more than 40 years. After a keen competition in international tender, Japanese group consisting of Mitsubishi Corp. Ltd., Toyo Electric Mfg. Co., Ltd., Kawasaki Heavy Industries, Ltd., and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. was accepted for 24 of new proto-locomotives. The group has delivered first 8 locomotives this time.

The Japanese group delivered the towing locomotives, which are now working in the Panama Canal thirty-eight years ago. On the basis of the track record, the Japanese group proposed a high-tech towing locomotive which has been developed focusing on resource saving and reduction of maintenance producing new technologies. Among manufacturers, Toyo Electric Mfg. Co., Ltd. was allotted to manufacture the electrical equipment and the windlass, Kawasaki Heavy Industries, Ltd. the body, and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. the gear unit.

This report describes running system and electric devices of the towing locomotive. Former PCC (Panama Canal Commission) to which we deliver products is renewed and started as ACP (Autoridad del Canal de Panama) after the return.

寺島 憲造      近藤 栄作      飯田 哲史      野村 英児  
Kenzo Terashima    Eisaku Kondo    Norifumi Iida    Eiji Nomura

### 1. まえがき

パナマ運河は1914年に、米国により建設、開通された20世紀最大の建造物の一つであり、開通後は世界海運の要衝として機能している。パナマ運河はその建設時の背景から、米国が運河地帯の租借権を有していたが、カーター政権時代に締結した2国間の条約により1999年末をもってパナマ共和国に管理運営権が全面的に返還された。

この新時代を担うべく約40年ぶりに新機関車の導入が決定され、激しい国際入札の結果三菱商事(株)、東洋電機製造(株)、川崎重工業(株)、三菱重工業(株)の日本グループがプロト車両24両の受注に成功し、今回先行の8両を納入した。

日本グループは、現在稼働中の曳船用機関車を納入しており、今回受注したものはこの実績をベースに新しい技術を導入した省資源、メンテナンス低減を重視したハイテク機関車である。製造メーカーは、東洋電機製造(株)が走行用電機品及びウィンドラス装置<sup>注1)</sup>、川崎重工業(株)が車体、三菱重工業(株)がギア装置を分担した。

今回は走行用システム、電機品について報告する。

なお、納入先であるPCC(Panama Canal Commission)は返還後ACP(Autoridad del Canal de Panama)として新しく発足した。

### 2. パナマ運河の概要

図1にパナマ運河の全体略図を示す。運河の構造は太平洋と大西洋間約62kmの中央に大人造湖であるガソン湖が位置し、この湖を水源とし海拔差約26mの区間を船の単独航行が可能となるよう、湖より太平洋側に2つの、大西洋側に1つの計3箇所の堰(ロック Lock)を築いたものである。この堰の中は船1隻が入れる大きさの幾つかに分離したプール(チャンバ Chamber)から成り立っていて、1チャンバの大きさは長さ1000フィート(約305m)、幅110フィート(約34m)、深さ70フィート(約21m)である。水位の調整はチャンバの底にあるバルブを開いて上段の水を下段に落とすことにより高低差を調整する方式であり、平たく言えば大規模な水によるエレベータである。

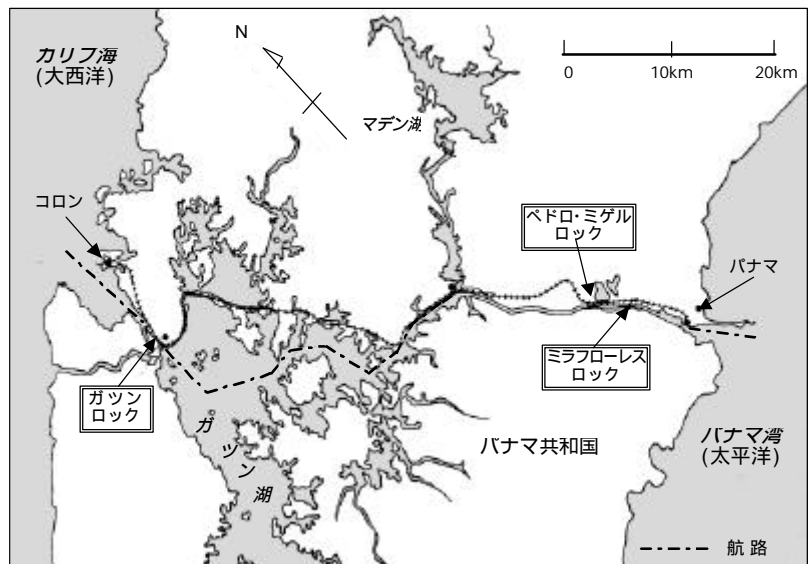


図1 パナマ運河地帯略図  
Fig.1 Map of the Panama Canal



図2 パナマ運河での曳船用機関車による曳船状況

Fig.2 Towing a ship by the towing locomotives at the Panama Canal

当然この部分は水路の幅が狭く、船の航行に当っては両岸に位置した機関車の補助が必要になる。

すなわち、機関車はロープで船とつなぐことで、船が航行中には風や荷の影響で水門や両岸に衝突しないよう、また水位調整の際には激しい渦により流されないように、牽引、制動あるいは位置を保持する機能を果たしている。

われわれ日本グループは、既存量産型機関車を納入しているが、これらの置換えおよびパナマへの返還後の輸送力増強に備え、実に約40年ぶりに新設計の機関車を製作することになった。また、近年は船のサイズも最大規格<sup>注2)</sup>となり、コンテナ船や自動車輸送船のように大型船の比重が増加し、新機関車の性能は既存車にくらべ高性能化を要求されることとなった。図2はパナマ運河で曳船中の状況である。

### 3. コンセプト

21世紀に使用される機関車として、下記のコンセプトで構築した。

#### 1) 省資源

モータには3相誘導電動機を使用してインバータで駆動し、電源は商用3相交流であるため、コンバータを配置することにより、全域回生制動を使えるシステムとした。

#### 2) メンテナンス低減

既存機関車の速度制御は、モータの極数切換、縦続接続切換を行いさらに減速器の減速比切換によっていた。しかし今回はインバータによる全域無段階速度制御を採用し、主回路接点数の低減、抵抗器の廃止による保守部品の低減を図るとともに、簡易型情報装置を搭載し保守の低減と故障時のリカバリーを早めるシステムを備えている。

#### 3) 運転操作性の改善

曳船に際して運転者には、機関車の速度を船の速度と一致させることと同時にウィンドラスも操作することが要求される。このため、走行制御は操作しやすいことが大前提となる。堰内の船の速度は最高で3mph(4.8km/h)であり、きわめ

て低速度で同期しやすい速度制御を求められる。このため任意の速度において、手動により容易に定速制御ができるシステムを構築し煩雑なノッチ操作を低減した。

#### 4) 輸送能力の向上

新機関車の最大出力は、3mph(4.8km/h)時に70,000lbs(311.2kN)を牽引しうる仕様で設計し、また、最高速度は単機回送時に10mph(16km/h)で走行できる性能を有する。これらの性能は既存機関車と比べ大幅に向上させた。

#### 5) 運転居住性の改善

曳船用機関車のため、曳船区間にはすべてラックレールが敷設されている。この保守状態は必ずしも良好でなく特に回送時には機関車に振動を与え、乗り心地を阻害させる要因となっている。このため、軸ばねのほかにオイルダンパを設置し衝撃の緩和を図っている。また、運転台の構造については視認性を向上させることに配慮したほか、エアークンデショナを設置し、運転環境を大幅に向上させている。

図3に曳船用機関車の外観を示す。



図3 曳船用機関車外観

Fig.3 Towing locomotive

#### 4. 走行システム構成

基本形態はB型機関車であり、駆動システムは各軸別個に構成し、片群運転を可能とする構成をとっている。

機関車の緒元を表1に示す。また、主回路接続図を図4に、走行制御ブロック図を図5に示す。

##### 1) パフォーマンス

曳船用機関車の走行状態は、曳船時と回送時の2種類に分

表1 曳船用機関車諸元表

Table 1 Features of towing locomotive

項目	内容
型式	2軸中央運転台式交流機関車
電気方式	3相交流 60Hz 480V
軸配置方式	A + A
機関車質量	50 t
最高運転速度	10mph (16km/h)
主要寸法	
車体長	10,600mm
車体巾	3,192mm
車体高	3,880mm
軌間	5'-0" (1,524mm)
軸距	4,572mm
車輪直径	841mm
性能	
最大引張力	3mph(4.8km/h)にて 70,000lbs(311.2kN)
勾配登坂能力	50% (5mph(8km/h), 無負荷)
動力伝達方式	ラック/車輪駆動切替方式
総合歯車比	26.575 (ラック区間)
主電動機	3相かご形誘導電動機
制御方式	ベクトル制御インバータによる無段階定速度制御
速度設定	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10mph
ブレーキ方式	電気指令式7段締切弁方式 常用: 回生制動(0.3mph(0.48km/h)まで) バックアップとして空気制動 非常: 空気制動 駐車: 手動ゆるめ装置付ばねブレーキ

1lb=0.4536kg

けられる。曳船は時間帯により交互にはなるが片方向の繰り返し(例えば堰の北端から南端へと)が基本運行であり南端への1曳船運行を終了し、次の曳船のために、すぐに北端に単機で折り返す。これを回送と称している。

曳船では、ウィンドラスのロープ先端を船の甲板にあるフックに引っ掛け、ウィンドラスによりロープに張力を加え、船と運河の岸壁との隙間を一定に保ちつつ船との相対位置を狂わせることなく走行することが要求される。通常は1隻に片側3両、両側6両の機関車が配置され、先頭部に各2両後方に各1両の配置となる。船がパナマ運河サイズの最大級のコンテナ船等であれば、片側4両の配置となる。

曳船時の最高速度は3mph(4.8km/h)であり、回送時には上記のように単機運転であり、現在の最高速度は9mph(14.4km/h)であるが、新機関車は10mphで走行可能となっている。

機関車に要求されるパフォーマンスは、曳船時のウィンドラス1台当り張力最大の35000lbs(155.6kN)を発生した状態で、3mph(4.8km/h)での力行運転を15分間連続したのち、5分間休止し、これの5回連続の繰り返しに耐える能力を有している。

また、堰には船を上下するために区切られたチャンバが数カ所設けられているが、この境界には50%(26.5度)の勾配がありこの坂を遊車の機関車1両を牽引し2mph(3.2km/h)で登坂できる性能を有している。

##### 2) 主回路

各軸ごとに搭載された電動機を駆動するためにインバータ及びその安定直流電源を確保するためのコンバータから構成され、各群を独立に制御するシステムである。保護協調は基本的には各群内でゲートブロック、接触器で対応し、最も電源側のNFBは各群の保護単位までのぎ装回路の保護が主眼である。

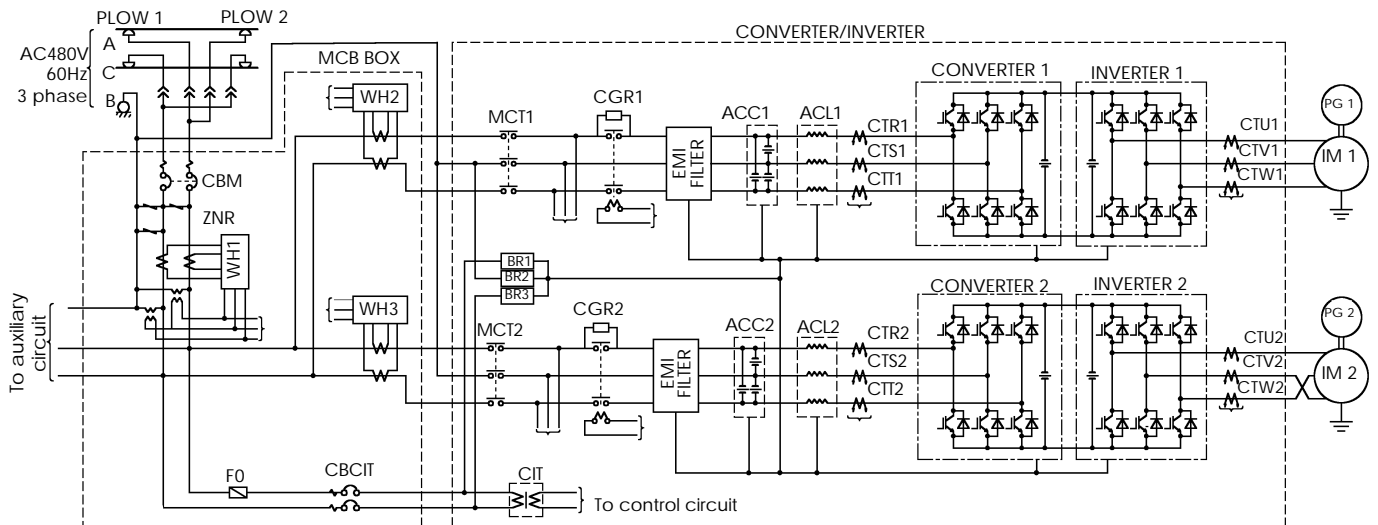


図4 主回路接続図

Fig.4 Main circuit connection

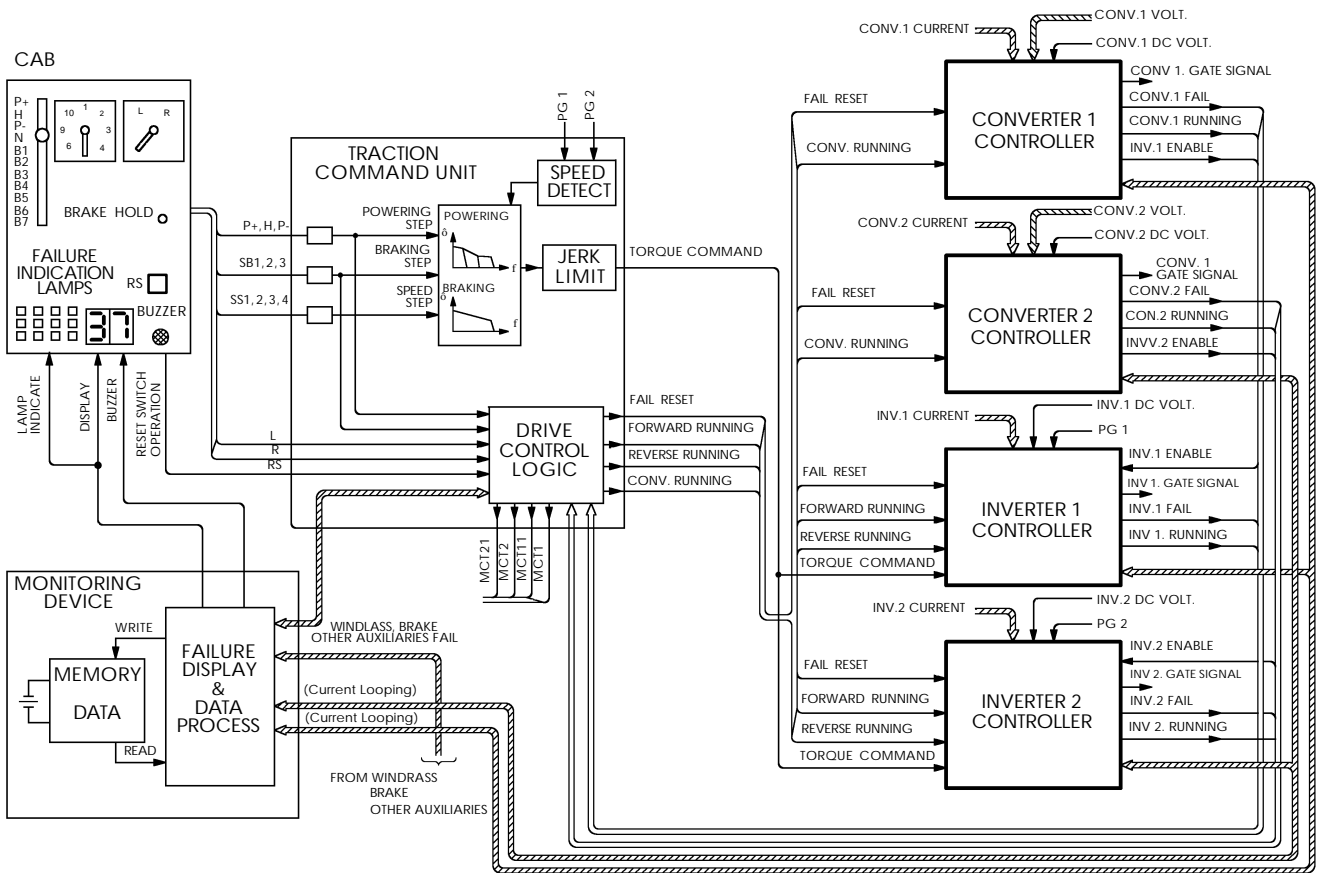


図5 走行制御ブロック図  
Fig.5 Control block diagram for traveling

新機関車は、運河の既存地上設備をそのままで使用できることが前提となっており、最大負荷電流、高調波歪率等には厳しい制約が設けられている。これに対応してコンバータには高力率制御を採用し、主回路フィルタ定数は回路網を詳細にシミュレートし決定した。また、電波障害に対する規制も厳しく主回路にはEMIフィルタを設けて対応するとともに、B相を接地（車体）している影響も考慮し仮想中性電位をスイッチング機器の接地電位とする配慮も加えている。

### 3) 補助回路

各補機類の電源は、電源に直接接続もしくは降圧した電源から供給している。各回路の保護は原則的にNFBによっている。制御電源にはDC24VとDC100Vの2系統があり、サービス電源はDC24V系によっている。

### 4) 走行用制御回路

曳船中に運転者は走行制御と同時にウィンドラスの操作も行うため、新機関車の走行制御は簡便な操作で船の速度と容易に同期できるよう定速度制御を基本に構成している。すなわちマスコンの走行用ノッチは3ポジションから成り、基本的に3つのポジションは「減速」、「定速」(同期)、「加速」のモードに対応している。機関車に比し慣性の膨大な船は停

止から加速するには非常に鈍重であり、また一旦速度が安定すればほぼ理想的な等速運動体と成る。したがって、上記の3ポジションのみで、その加減速率が一定であっても数回のノッチ操作で最終的に船と速度が同期する操作が可能である。また、機関車の最高走行速度を規定する速度設定スイッチ(SSS)には1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10mphの8ポジションがあり、機関車の最高速度はこの設定速度に制限される。

ブレーキは、電気指令式締切弁方式の電空非演算システムで構成した。これは、回生負荷で十分減速度をまかなえることと、回生失効の機会は架線停電等だけの場合で極めてまれであることから、保守性を重視した構成を優先したものである。

また、先に述べた曳船時に船の後方に位置する機関車は、曳船中にはブレーキを継続的に使用し続ける必要があり、既存機関車の空気ブレーキに比しブレーキ部品の摩耗は格段に改善されることになる。なお、非常ブレーキは空気のみによる機械ブレーキが、停電時はスプリングによる機械ブレーキが作用することで、安全性を確保している。

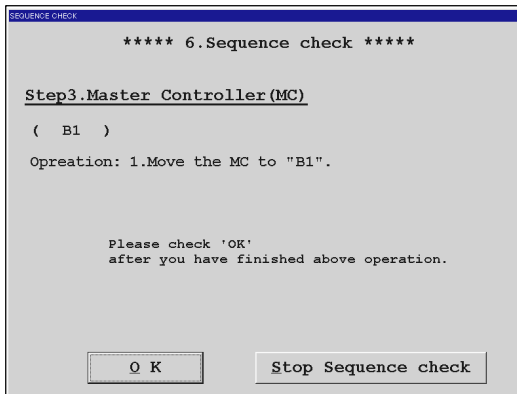


図6 シーケンスチェック画面  
Fig.6 Example of sequence check display

さらに、保護機能として勾配区間内の過速度防止、全区間での衝突防止、デッドマン等の保護機能を新たに設けた。また、勾配区間やラック区間と非ラック区間の識別信号により機関車の引張りパターン等の制御要素を変更する機能を有している。ベクトル制御と定速度制御にはモータに付属したPGからの信号を使用している。

#### 5) 情報システム

メンテナンスの低減とトラブルシューティングの効率化のため、簡易型情報装置を採用した。基本機能として下記のものに有している。

- 保守時間低減のためのシーケンスチェック機能
- 運用管理データの自動採取機能
- 長期間にわたる故障状態の記録機能
- 重要不具合のトレースデータ出力機能
- コード表示による故障表示機能

上記のために、走行制御用CPU装置とは別に、情報管理用CPU装置である情報装置(Monitoring Device: MD)を運転台に搭載した。この装置には、上記の機能に必要な各種入力信号が取り込まれ、その論理判断の結果により必要な信号を表示させたり、関連機器に伝送する機能を有している。MD内部のデータの外部への出力やシーケンスチェックに際し必要な操作や結果は、MDにその都度接続したパソコン(Windows版)から指示、かつ保存して管理データとして活用できる。

図6にシーケンスチェック画面の一例を、図7に管理データのうち稼働時間管理の出力例を示す。

### 5. 機器構成

#### 5.1 主電動機(TDK6460-A)

主電動機は、強制風冷式三相かご形誘導電動機であり、出力容量は216kWである。固定巻線の絶縁にはC種絶縁を採用し、冷却は強制風冷である。ブロワモータの故障やフィルタの目詰まりを検知する目的で、フィルタ前後の空気圧を監

***** 2.Operation working time *****						
Locomotive number : 100						
Operation working time from 24/12/1999 to 8/ 1/2000						
A unit is hour						
	Date	Locotive	No.1 C/I	No.2 C/I	No.1 Windlass	No.2 Windlass
1	24/12/1999	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	25/12/1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	26/12/1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	27/12/1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	28/12/1999	3.0	0.2	0.2	0.0	0.0
6	29/12/1999	1.9	0.0	0.0	0.3	0.4
7	30/12/1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	31/12/1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1/ 1/2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2/ 1/2000	1.9	0.3	0.3	0.0	0.0
11	3/ 1/2000	8.6	0.4	0.3	0.0	0.0
12	4/ 1/2000	2.0	0.5	0.5	0.1	0.1
13	5/ 1/2000	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
14	6/ 1/2000	13.9	3.5	3.5	3.8	3.7
15	7/ 1/2000	24.0	10.5	10.5	7.9	11.2
16	8/ 1/2000	18.7	8.5	8.5	8.8	9.7
Sum		76.9	23.9	23.8	20.9	25.1

図7 機関車稼働時間管理データ出力例  
Fig.7 Example of locomotive operation data

視する気圧スイッチによる保護検知機能をもたせている。軸受け周りは、長期間の無給油・無点検を考慮した密閉式を採用し、またベアリングには絶縁形を採用している。

主電動機の定格を表2に、外観を図8に示す。

表2 主電動機定格

Table 2 Ratings of main motor

出力	216kW
電圧	530V
電流	305A
周波数	40Hz
回転数	1174rpm
すべり	2.1%
常用最大回転数	4255rpm( 10mph(16km/h)時 )



図8 主電動機  
Fig.8 Main motor

5.2 コンバータ・インバータ装置 (RG667-A-M 形)  
 運転台下にぎ装されるコンバータ・インバータ装置の  
 主要構成ユニットを表3 に、外観を図9 に示す。

表3 主要構成ユニット

Table 3 Major components of converter/inverter

インバータユニット	2
コンバータユニット	2
主回路フィルタ	2
制御ユニット	1
制御継電器盤	1



図9 コンバータ・インバータ装置 (C/I)

Fig.9 Converter/Inverter

1) インバータユニット

インバータにはモータの速度域が非常に広範にわたり、かつ各速度域で曳船のために安定したトルク制御が求められるため、高精度のトルク演算が可能なベクトル演算による IGBT インバータを採用した。当社ではこのインバータシステムを汎用機器部門で開発してきたが、今回これを鉄道車両に適用するための見直しを実施し採用した。ユニットは IGBT、フィルタコンデンサ、制御基板、ゲート駆動回路基板及び通信用基板等を一体化し、コンパクトに構成した。入力直流電圧は DC720V、出力電圧は最大 530V であり IGBT は 1200V300A 素子で構成し、各群独立のユニットとし共通化を図った。なお、IGBT の冷却は強制風冷方式である。

2) コンバータユニット

コンバータは高力率でかつ電源高調波を抑制するに有利な瞬時ひずみ最小化制御による正弦波コンバータを採用した。この方式の採用で電源歪率は定格点で 5%以下、及び力率を 1 とする制御を可能とした。構成部品はインバータと共通化を図ることを基本にほぼ類似の構造としている。入力の変動範囲は AC420V ~ 500V であり、出力直流電圧は DC720V である。IGBT は 1200V300A 素子で構成し、各群独立のユニットとしインバータと同様共通化を図った。

3) 主回路フィルタ

高調波抑制用のリアクトル、コンデンサ及び電波障害抑制

用 EMI フィルタを設け、既設備への障害を防止した。

4) 制御ユニット

運転台からの指令や各機器とのインタフェースを担当し、運転条件の許可判断、各インバータに指示するトルク指令及び定速制御論理、保護動作判別、記録保持などの機能を有する制御演算部であり、標準ラックで構成した。

5) 制御継電器盤

運転指令や保護動作用、及び表示用継電器を収納した。

5.3 MCB-Box (Circuit Breaker Box) (S1217-A-M)

運転台内に設置されるサーキットブレーカ装置である。

図10 にサーキットブレーカ装置外観を示す。

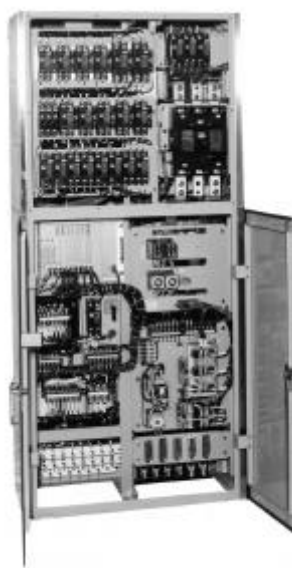


図10 サーキットブレーカ装置

Fig. 10 Circuit breaker

1) NFB

主電源 NFB や各種電源 NFB、補機類 NFB、補助電源関係の NFB を正面から操作できるように配置した。NFB は汎用品を基本に選定している。

2) 情報装置ユニット (Monitoring Device : MD)

各装置からの情報の受信や各種故障の論理演算及び故障表示出力などの機能を有する情報制御演算部である。また、C/I 関係のトレースデータや電力量計記録及び稼働記録は MD 内に保存される。これらの保存データ類は MD 前面のコネクタからパソコンへ伝送できる。

3) サージプロテクタ

落雷などから機器を保護するためにサージ吸収器 (ZNR) を設置した。

4) 積算電力量演算部

機関車全体、主回路各群、ウィンドラス各群の 5 系統電力量測定用演算部を収納し、演算結果のパルス出力を 2) 項 MD に送信する。電力量は系統別に MD 内にて積算される。

#### 5.4 トラクション・マスター・コントローラ (MC)

図11に外観を示す。

運転者の斜め右前に設置されるトラクション・マスター・コントローラであり、加速側3ノッチ、ブレーキ側7ノッチ、中立位置の計11ステップのワンハンドル形マスター・コントローラである。加速側のノッチは「P-」「H」「P+」と刻まれ「P+」に投入すれば一定の傾斜でトルク指令値が上限値まで上昇し、「H」に投入した時点で、その時の速度を指令速度とし定速制御に入る。また「P-」は逆に一定の傾斜でトルク指令値が下限値まで引き下がる。



図11 トラクション・マスター・コントローラ  
Fig.11 Traction master controller

任意の点で「H」に移せば再度その時点の速度で定速制御に入る。

#### 5.5 インディケーション・ボード (Indication Board)

図12に外観を示す。

装置上面に速度設定スイッチ (SSS), 方向切替器を配置し、前側面には各装置単位の故障表示灯, ラック区間, 勾配区間などの表示灯, 及び各種故障のコード番号の表示部が配置してある。



図12 インディケーションボード  
Fig.12 Indication board

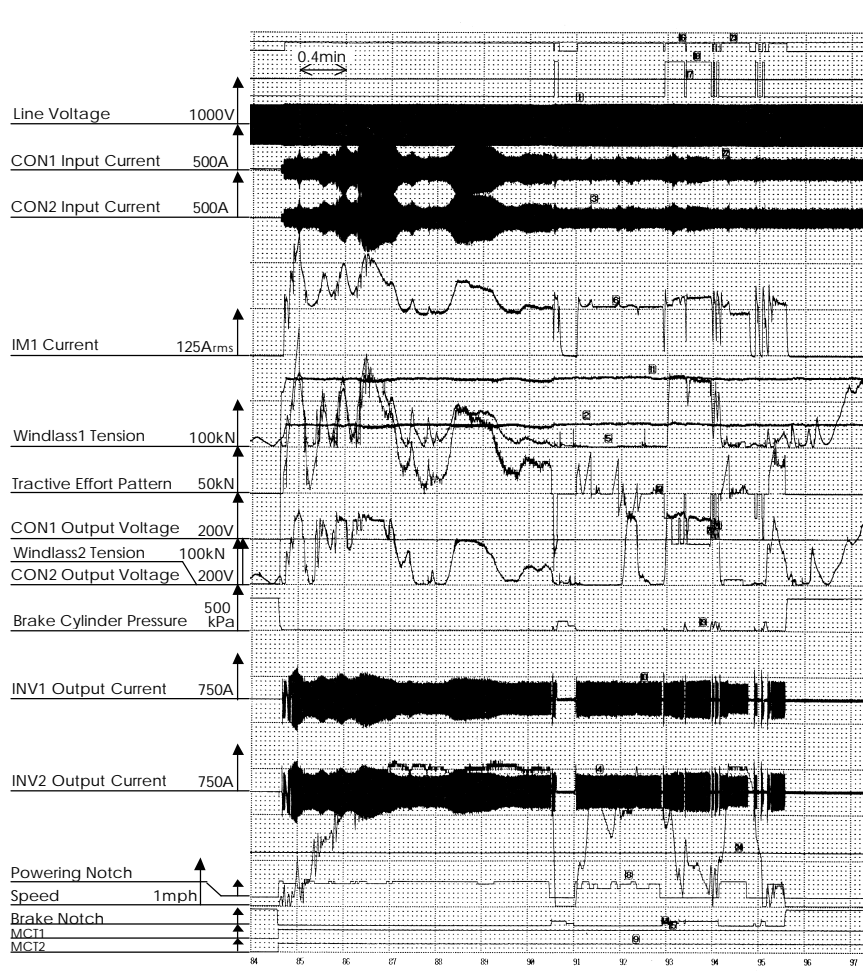


図14 走行データ

Fig.14 Data of travelling

## 5.6 プラウ(Plow)

集電靴であり、冗長系のため機関車 1 台に 2 個装備している。今回は ACP が既存車で改造してきたものを基本に構成したが、車体側との接続に使用するコネクタについては、新開発したものを採用した。プラウの外観を図 13 に示す。

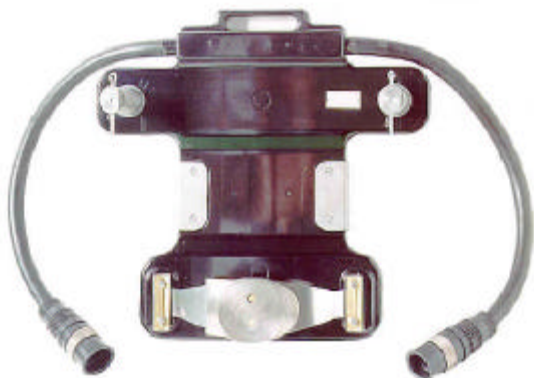


図 13 プラウ  
Fig.13 Plow

## 6. 現地走行試験

今回 8 両の新型機関車は、ミラフローレスロックにおいて 6 ヶ月間にわたる走行試験を継続中であり、24 時間の曳船運行を行っている。この試験結果を量産車に反映していくことになる。なお、現地では、運転操作性を改善するために ACP とも協議を重ね数々の試みを適用した。

曳船時の代表的な走行データを図 14 に示す。

## 7. むすび

新機関車は、日本グループが約 40 年前に納入した既存機関車の実績を踏まえ、かつ 21 世紀に向けて最新の技術を採用し製作した。運河がパナマ共和国に返還された時期とあいまって、製作された新機関車が新時代の象徴として、パナマ運河の新しい顔となることを期待するものである。

終わりに今回の機関車の製作に当り、多大なご指導とご協力を頂いた ACP (旧 PCC) と、日本グループの三菱商事株式会社、川崎重工業株式会社、三菱重工業株式会社及び関係者に厚く御礼申し上げます。

### 注 1) ウィンドラス (Windlass) 装置

機関車と船との間にロープを張り、油圧駆動により最大 35000lbs(155.6kN)まで張力を発生する装置を示す。機関車 1 台に前後各 1 台の独立したウィンドラスを搭載している。またロープの巻出し、巻込みの速度は 2 種類で切換えることができる。

本装置の技術的解説は次号に譲る。

注 2) 運河通過可能な船は最大 60,000 ~ 70,000 トン級で、長さ 965 フィート(294m)、幅 106 フィート(32.2m)、吃水 39.5 フィート(12.0m)までである。

## 執筆者略歴



### 寺島憲造

1972 年入社。制御機器設計、品質保証に従事。現在横浜製作所交通設計部本社駐在にて車両システムエンジニアリングに従事。パナマプロジェクトリーダーを兼務。



### 近藤栄作

1978 年入社。相模工場技術部にて車両用 VVVF インバータ制御システムの開発・設計に従事。現在、横浜製作所交通設計部に所属。



### 飯田哲史

1993 年入社。相模工場鉄道設計部にて車両用制御装置の設計に従事。現在、横浜製作所交通設計部に所属。



### 野村英児

1994 年入社。相模工場鉄道設計部にて、車両用制御装置の開発・設計に従事。現在、横浜製作所交通設計部に所属。