特　集　論　文

シンガポール・チャンギ国際空港向けAPMシステム“クリスタルムーバー”

Automated People Mover "Crystal Mover" for Singapore Changi International Airport

柏　誠[*1]　持留裕之[*2]　山本　新[*3]
Makoto Kashiwa　Hiroyuki Mochidome　Arata Yamamoto

当社はシンガポール民間航空庁（CAAS）チャンギ国際空港向けに新設する第３ターミナルを核としたターミナル間を結ぶ移動手段として“Crystal Mover（クリスタルムーバー）”を受注した．新しく導入する新交通システムは，斬新で未来的な車両デザイン，既存システムの構造物を有効活用し，新規軌道と接続させる設計，及び既存から新システムへの継ぎ目無いサービスの要望を実現するものとして第１から第３までのすべてのターミナルを結ぶシステムを提供している．本報では新しいクリスタルムーバーとその導入過程を紹介する．

1. は　じ　め　に

近年，東南アジア，東アジア地区ではいくつかの新規空港建設，もしくは既存空港の拡張が行われ，バンコク新空港，中部（名古屋）国際空港などがその例に挙げられる．経済発展によりアジアのみならずヨーロッパ，オセアニア，北米との結びつきも強まり，より快適に便利に乗り継ぐハブ空港として，さらにはアジア圏内の往来が活発になり，これらを無駄無く結ぶ域内の拠点として機能を拡張，もしくは新設し発展を続けている．

シンガポール民間航空庁（CAAS）は第３ターミナル建設によってその空港機能を拡張することを目指し，2002年，各ターミナル間を連絡する交通システムとして当社“クリスタルムーバー”を選定した．シンガポール民間航空庁（CAAS）はその採用にあたって“斬新な車両デザイン”，“1990年に開業し運行していた既存システム用構造物の積極的流用”，“新システムへの速やかな移行”を実現することを要求しており，当社はその実現に向けて活動してきている．特に既存から新システムへの移行は，はじめに既存システムの一部を改造して先行営業を行い，その後第３ターミナル開業に向けて全線へ拡張する方針で工事が進められており，当社としても初めての試みとなる．既に2006年３月16日に先行開業部分を引き渡し，営業運転に入っており，現在は2007年６月の全体システムへの拡張，引渡しの準備として試運転を行っている．

2. APMシステムの概要

シンガポール・チャンギ国際空港APMシステムは単線換算6 400 mで構成され，この中には既存システムの改造区間約1 300 mが含まれている．システム構成はPMS/North（総延長4 100 m）及びPMS/South（総延長2 300 m）と呼ばれる２つの独立した軌道グルー

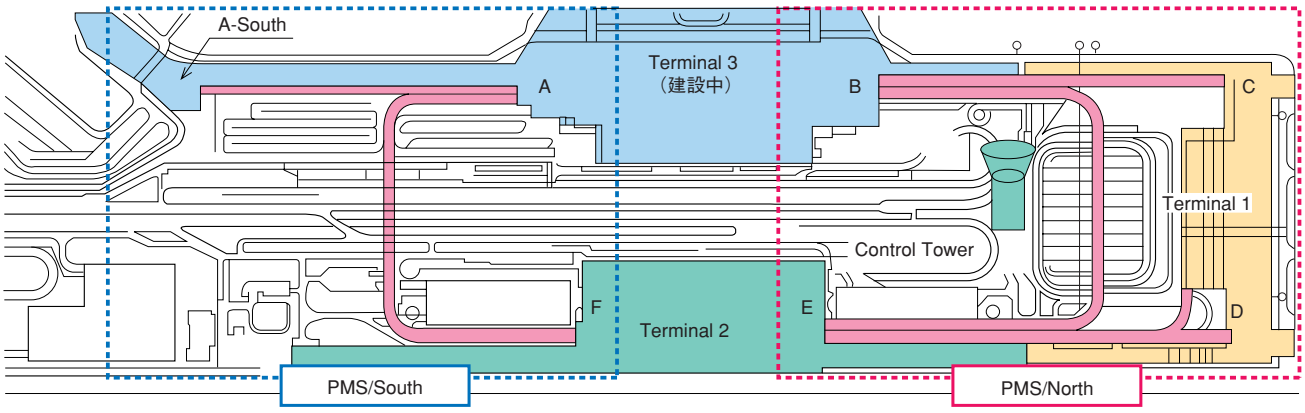

図１　空港全体図

[*1] プラント交通システム事業センター交通システム・機械技術部交通システム設計課主席
[*2] プラント交通システム事業センター交通システム・機械技術部次長
[*3] プラント交通システム事業センター交通システム・機械技術部信号設計課

プに分かれており，それぞれ独立した検修設備を併せ持っている．PMS/South はターミナル間を移動する乗り継ぎ及び出国審査を終えた搭乗客用としてターミナル２とターミナル３，及びターミナル３間を運行している．PMS/North は空港を利用する一般客用としてターミナル１，ターミナル２及びターミナル３間を往復している．また，本システムは他の空港交通機関（タクシー，地下鉄）及び駐車場とも接続し，空港から市内への接続をより快適にする一翼を担っている．

本システムは７つの駅（A-South，A，B，C，D，E，and F）で構成され，近傍の搭乗ゲートの名前を冠して乗客にわかり易い配置となっている（図１，図２）．

APM の中央司令室は A-South 駅の近くのメンテナンス事務所内に配置され，さらに副司令室がターミナル３ビル中央部に配置されており，いずれの司令室からも全システムを制御することが可能となっている（図３）．

これらを含め，当社は上記システムにおいてコンクリート走行路，軌道・駅機器，電力システム機器，信号システム機器，通信システム機器，メンテナンス機器，及び車両の設計，製作，据付，試運転が施工範囲に含まれている．

3. クリスタルムーバー車両

当社は 16 両の“クリスタルムーバー”をシンガポール・チャンギ国際空港に納入した．これらの車両は PMS/North に 10 両，PMS/South に 6 両配置されている．オリジナルの“クリスタルムーバー”のデザインとは異なる５種類の斬新な“顔”のイメージを客先に提案し，最終的に図４に示す車両をモデルとしたイメージ図を選択頂いた．オリジナルの斬新で先鋭的なイメージ図を忠実に再現する様，実設計に配慮し図５，

図２　APM プラットフォーム

図３　中央司令室

図４　オリジナル“クリスタルムーバー”とチャンギ空港向けレンダリング

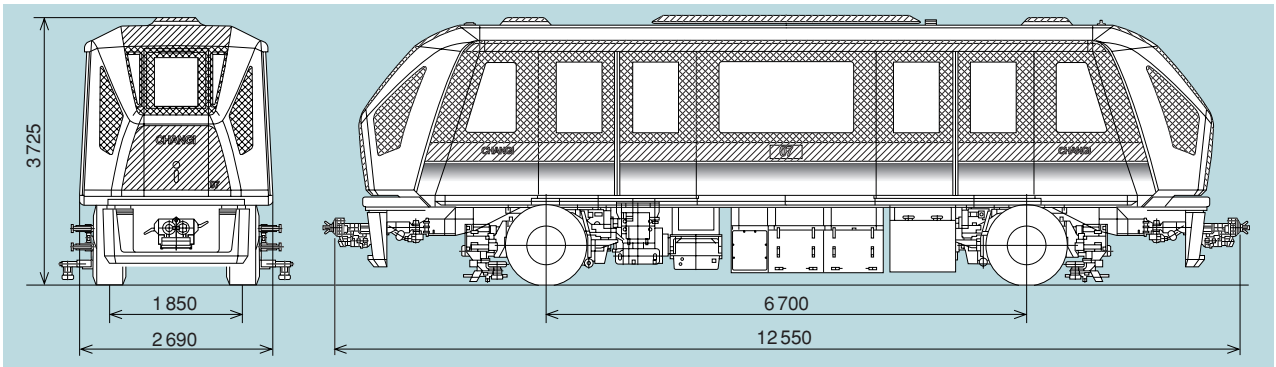

図５　車両形式図

図６　チャンギ空港向け車両

図７　車両内装

図６，図７のような車両を製作するに至った．本車両のデザインは経済産業省が 1957 年以来開催している“グッドデザイン賞”を 2006 年度に受賞している．

当社は要求されるシステムにあわせて単車運転から複数の連結車両まで幅広い選択肢で対応しており，チャンギ空港 APM システムでは単車×２両でターミナル１からターミナル２間を運行中であり，将来は３両までの拡張計画を有している．

4. 信号・通信システム

4. 1　信号システム

チャンギ空港 APM システムで採用している信号システムは信号保安および自動運転システムは国内新交通システムの方式に準じており，チェックイン･チェックアウト方式による列車検知及び実績のある自動列車制御システムを適用している．

本 APM システムにおいては，駅での列車定点停止位置から軌道端末までの過走防護距離が建築上の制約から短く設定された為，車上 ATP による ORP（過走防護制御方式）を採用している（図８）．列車が ORP 信号現示区間に進入すると車上 ATP（自動列車制御装置）が車上 ATO（自動列車運転装置）による定点停止制御パターンを防護する形で ORP 制御パターンを生成し，列車速度が ORP 制御パターンに抵触すると非常ブレーキが作用し列車は安全に非常停止する．

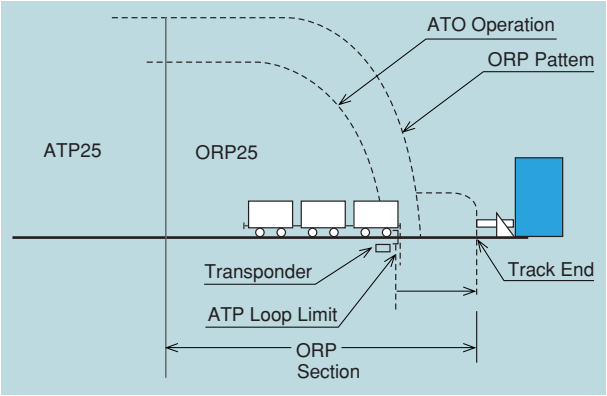

図８　過走防護システム

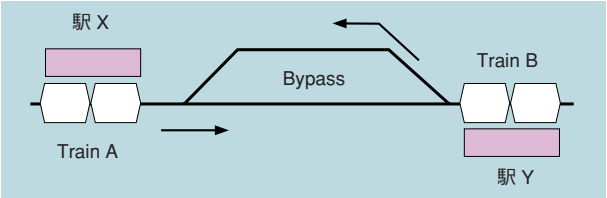

図９　バイパスシャトル

図 10　バイパスシャトル（写真）

4. 2　運行管理システム

本システムは列車を投入／引き込みの際に営業運転中の路線を経由するため経由先の営業路線を考慮した車両の操車が求められ操作が複雑になる．効率的な操作性及び運行を実現するために列車の発点及び着点を選択することで自動進路制御することでオペレータの負担を軽減している．

さらに本システムの運行における特徴としてターミナル２とターミナル３間において図９，図 10 に示すような列車はバイパス運行されており，対抗するお互いの駅を同時出発・到着するように同期制御を行っている．具体的には，駅停車時間のカウントを列車の駅停車状態を判断して自動調整することで駅出発時の同期を行い，また駅出発時に地上駅制御装置から車上に対して付加される信号を ATO が認識することで駅間走行時の列車速度を調整しバイパス部のすれ違い時

図 11　車上 CCTV カメラ

図 12　フライトインフォメーション

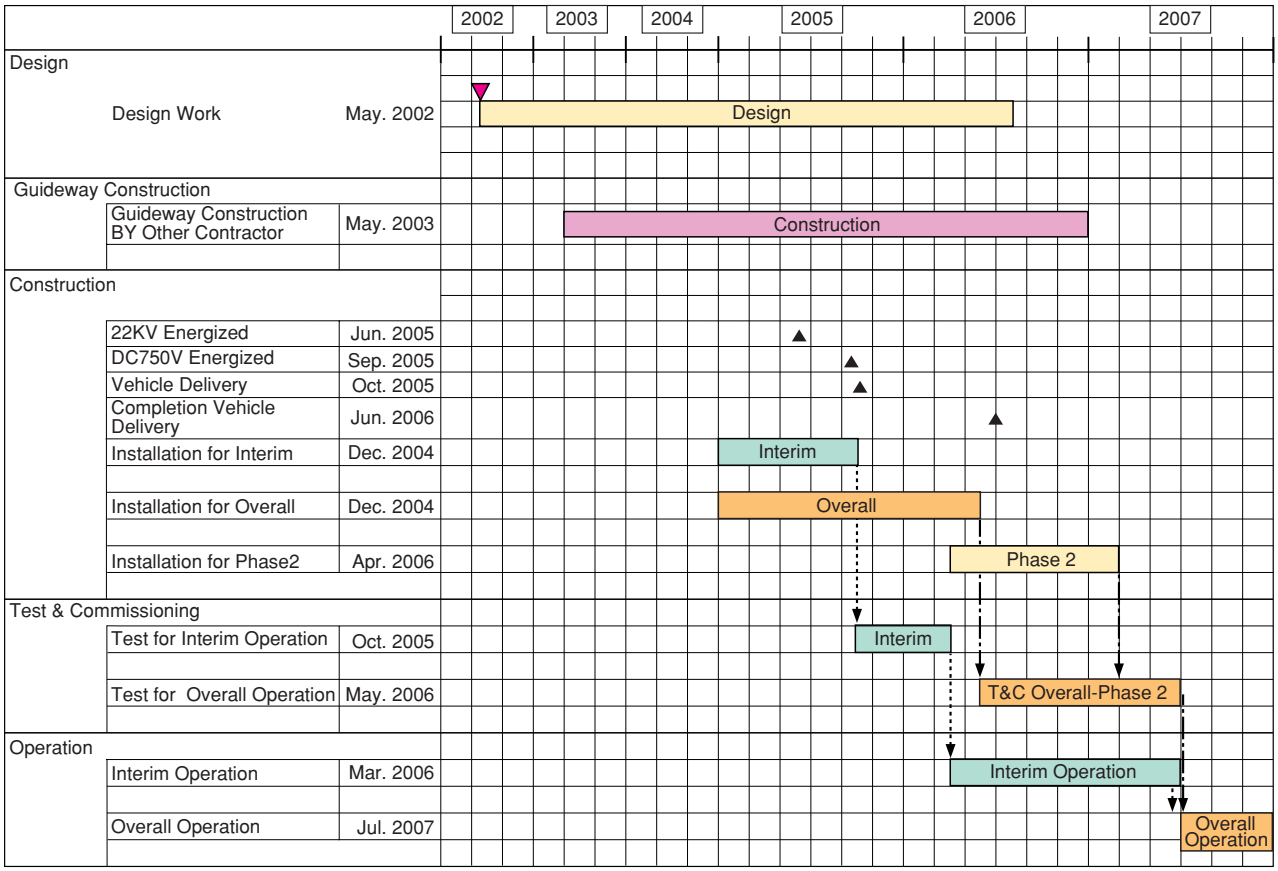

図 13　プロジェクトスケジュール

のタイミングを最適化することにより到着時の同期を図っている．

4. 3　通信システム

運行に特に重要な車両 - 地上間の音声通信及びデータ伝送に周波数申請，認可を受けた特定の 400 MHz 周波数帯を 3 ch（音声，音声制御，データ伝送）使用した無線空間波方式を採用している．PMS North 及び PMS South エリアに各 2 台ずつアンテナを設置して全エリアをカバーし，車内監視を目的とした車上 CCTV システム（図 11）には 2.4 GHz 帯，車上案内情報表示システム（フライトインフォメーション及び広告等）（図 12）には 5.2GHz 帯を用いた無線通信により，画像／情報データを車両 - 地上間で送受信している．地上側の基幹データ伝送には光伝送路の冗長性構成を伴った光伝送装置を各駅に設備し信頼性を確保している．

5. 建　設　工　事

建設工事は 2 つの異なるステージから構成されている（図 13，図 14）．第 1 ステージは既存のシステムを改造して早期に営業運転を行う予定の“暫定運転工区（Interim）”と新規に軌道を建設し，ターミナル

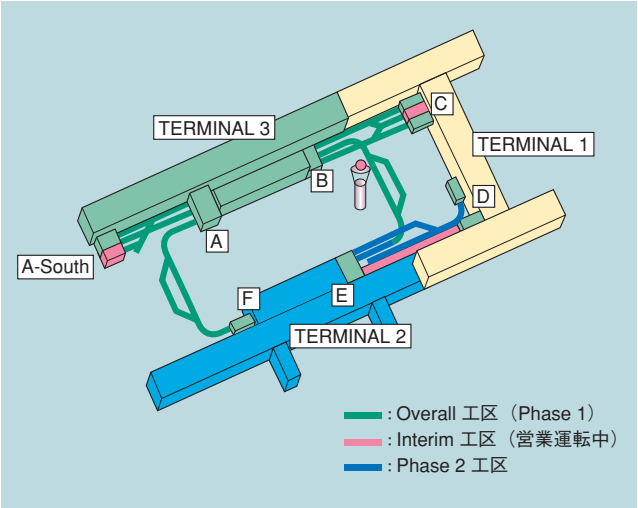

図 14　全体の軌道

3 と既存のターミナル間を連絡する“全体運転工区（Overall）”の建設（全体の 70 %）を指し，我々は“Interim”及び“Overall”とそれぞれ呼んでいる．

第 2 ステージは“暫定運転工区（Interim）”の営業を開始した後，それまで稼動していた既存システムを止め，新たに既存システムの構造物を活用した建設工事（全体の 30 %）をさす．我々はこの工事を“Phase 2”と呼んでいる．

特に第 2 ステージでは“既存システム構造物を活用した新システムへの移行”及び“長期の営業運転停止無しで既存から新規システムへの速やかな切替”という 2 つの課題の遂行を求められている．以下に示す工事手順にそって建設工事を行い，現在ステップ 3 に到達している．

(1) ステップ 1

複線の既存線軌道のうち，片側（枠内）の運行を止めて客先契約業者によって既存システムの軌道及び走行路を取り払われ，側方案内システムである我々の軌道およびアライメントにあわせて側壁の追加等の改造・および駅建設工事を行った．もう一方の軌道では新システムが稼動するまで営業運転を継続された．客先所掌の改造工事は 2004 年の 10 月に開始され，追いかける形で 2004 年 12 月より新規システムの据付工事に着手した（図 15）．

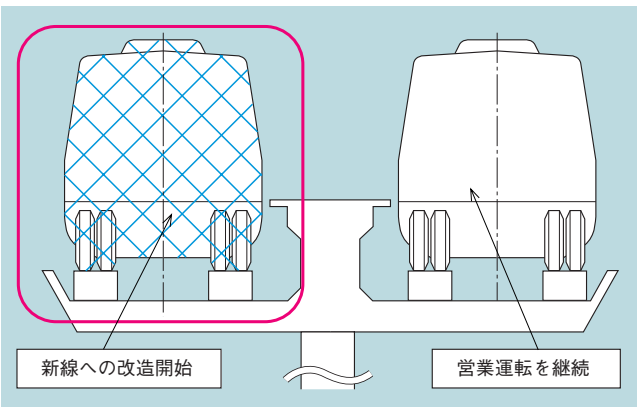

図 15　既存システムの改造（ステップ 1）

(2) ステップ 2

2004 年 12 月より 9 月までの約 9 ヶ月間で約 550 m の区間において走行路から軌道，ケーブル工事に至るシステム工事を完成させ，10 月には 2 台の“クリスタルムーバー”を搬入し試運転を開始した．試運転は 2006 年 3 月中旬まで続けられ，暫定開業運転を 2006 年 3 月 16 日より正式に開始した（図 16）．この暫定開業運転と同時に既存のシステムはその運転を止め，新たに改造工事を開始することとなった．

この工事と平行して全体の 70 % を占めている新規の軌道“Overall”も 2005 年初頭より同様に走行路，軌道，電路，電力，信号，通信，駅設備，メンテナンス設備の各システム工事の工事が行われ，2006 年 7 月に完成し，試運転調整を続けている．

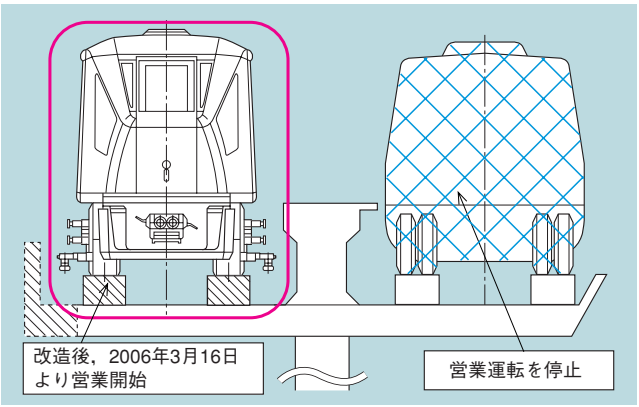

図 16　既存システムの改造（ステップ 2）

(3) ステップ 3

暫定運行開始後，残された既存区間及びその軌道に隣接する新規軌道区間の工事が開始され，2007 年 3 月現在，建設工事はほぼ完成し，試運転を開始した．複線だった軌道は全部で四線が並行する大きな軌道となり，2007 年 7 月の引渡しを目指し，試運転中である（図 17，図 18）．

6. 暫　定　開　業

既存システムを取り替えた先行開業区間であるターミナル 1 とターミナル 2 間の“暫定営業運転”は 2006 年 3 月 16 日に開始され，既に 14 ヶ月が経過した．

1 両は乗り継ぎ客用として，もう 1 両は一般客向けとして 2 両固定編成で運行されている（図 19）．

営業運転時間は朝 6 時から深夜 1 時 30 分までの 19.5

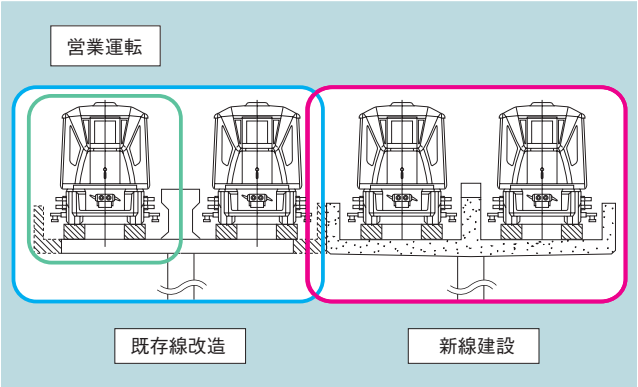

図 17　既存システムの改造（ステップ３）

図 19　暫定営業運転

図 18　既存システムの改造（ステップ３写真）

図 20　空港利用客

時間に約５分の運転間隔で行われ，これまでの 14 ヶ月で走行距離約 114 000 km，約 8 000 時間走行し，平均稼働率は 99.8 %に達している．暫定開業のため，予備車両無しでの夜間のみのメンテナンス作業を強いられる中での営業運転となっているが高い稼働率を維持している．この暫定運転は全体開業まで続けられ，営業運転を止めることなく暫定システムから全体システムへ速やかに移行させることを目的として運行されている．

7. 全　体　開　業

現在，暫定運転を敢行中であるが新たに建設されている第３ターミナルの営業にあわせ本格的な営業運転に入る予定である．全体開業の際には各駅間をシャトル運行で結び，空港の乗降客の状態に合わせ，ピークモード，オフピークモード，オンコールモードの３つのパターンを繰り返し，24 時間運行を予定している．

8. お　わ　り　に

当社は客先の要求に対し，柔軟に対応すること，及び注意深く計画・実行することによって既存のシステムを使用することによって発生する拘束条件等を解決し，既存のシステムに影響を与えず，なおかつ長期の使用不可能な時間を作ることなく，システムを切り替えてきた．また，営業運転においては高い稼働率によってその信頼を獲得している．

プロジェクトは全体システム引渡し前の最終段階に到達しており全体開業に向けて安全に工事が完了するよう心がけている．

さらに空港の利用客が楽しく快適に空港内を往来できるよう安全で快適な当社の APM システムを提供し続けていかなければならないと強く思う次第である（図 20）．

最後に，本 APM システムプロジェクト遂行にあたり，ご指導ご協力頂いた関係各方面の方々に深く感謝いたします．

柏誠

持留裕之

山本新