

空港向け無人運転車両—香港新空港向け APM 車両—

Automated People Mover for Airport

三原製作所 持留裕之*1 小泉理夫*2
高橋益夫*3

近年、空港規模の拡大に伴い、空港内の旅客移動の手段として軌道系を始めとする輸送システムの設置が不可欠となってきた。このような環境の中、当社は香港新空港向けに無人で自動運転されるゴムタイヤ車両方式の APM システム (Automated People Mover System) を受注した。その中心である APM 車両は、国内の新交通システム車両を基本としている。24 時間連続で全自動無人運転される空港内輸送システムへの適用に当っては、自動列車制御装置 (ATC) の構築、保安機能の向上、停止精度の向上等の課題があった。その各々について、本報に概説する対策を施し設計・製作を行った。さらに、完成した APM 車両を社内試験線で試験・検証した結果、所期の目標を達成していることを確認した。

Recently, as the size of each airports has grown a track transportation system inside the airport for passengers has become indispensable. Under such circumstance, MHI have received an order for APM system, which is a completely automated rubber tired vehicle, to be installed at the new airport in Hong Kong. The core of the APM vehicle system is designed based on the vehicles of the domestic (Japanese) new transportation system. In order to apply the system to the airports, we had various issues to solve including automatic train control system improvement of safety functions, stopping accuracy and so on. In this report, we explain outline of the work we did during design and manufacture stages. We have tested the completed APM vehicle on our test track. As a result of the test, we confirmed that the vehicle had come up to the target level.

1. ま え が き

近年、東南アジア諸国を中心に世界各国でハブ空港の新設及び既存空港の拡充が盛んである。空港規模の拡大に伴い、空港内及びその周辺での移動旅客の増加及び旅客の移動距離が長くなる傾向にある。そのため、これらの大型空港においては、軌道系を始めとする輸送システムが不可欠となってきた。

当社は、空港向け輸送システムの第一号として香港新空港向け APM システム (Automated People Mover System) を受注した。現在、既にシステム全体の工事を終え、1998 年春の開港・運用開始に向けて最終調整中である。本報では、そのシステムを中心となる全自動無人運転車両 (以下、APM 車両と称す。図 1 参照) について概要を報告する。

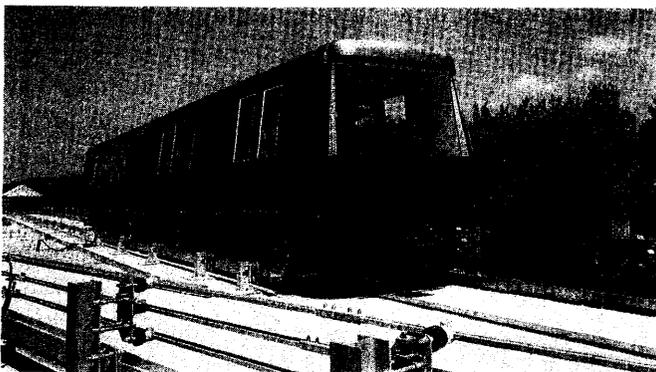


図 1 車両外観 社内試験線で全自動無人運転中の APM 車両を示す。
Vehicle on MHI test track

2. APM システムの概要

香港新空港向け APM システムは、空港ターミナルビルと遠隔のゲートを結び、航空機乗降客の空港内移動に供されるものであ

表 1 APM システムの構成
Sub-system of APM system

サブシステム	主たる構成要素	機能
車両	車両	輸送単位
運行管理装置	運行管理装置	全システムの運用・管理
信号装置	ATP/TD 装置	信号・保安機能
通信装置	ATO 伝送装置、LCX 伝送装置	地上-車両間の通信
自動運転装置	車上 ATP/ATO 装置、駅 ATO 装置	車両の自動運転
電力・電路設備	変電設備、電車線	システム・車両への電力供給
軌道	走行路面、案内軌条、転てつ器	車両の走行路線
駅設備	プラットホームドア	乗降客の安全確保
検修設備	メンテナンス機器	車両のメンテナンス設備

注) ATP/TD: Automatic Train Protection/Train Detection

る。本 APM システムは、表 1 に示すように車両を中心に運行管理装置、信号装置、通信装置、自動運転装置、電力設備、軌道、駅設備、検修設備のサブシステムから構成されている。今回の契約は第一期工事で、2 駅、駅間約 700 m 複線の路線で、全区間地下トンネルである。システムの輸送力は、最大 5 270 PPHPD (Passenger Per Hour Per Direction) である。

車両の運行は、自動列車制御装置 (ATC) による全自動無人運転である。ATC 装置は、ATP、ATO、ATS で構成されている。ATP は、車内信号現示方式、チェックイン・チェックアウト方式を採用し、SSI 装置によるルートコントロールを行っている。ATO は、車上演算方式で定位置停止機能を持っている。また、車両のドア及びプラットホームドア協調制御のための駅 ATO 装置、車両と地上設備との ATO データ伝送装置を備えている。ATS は、システムの運転指令、運行監視、運行記録の機能を持ち空港内の中央指令室に設置される。指令卓はタッチスクリーン式の CRT オペレーション方式とし、緊急時を除き 1 人のオペレータにより運転管理が行えるように設計している。

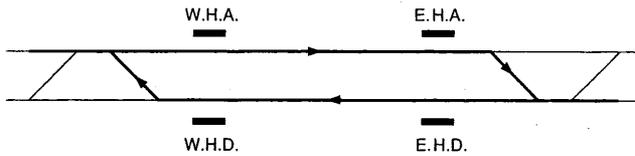
空港が 24 時間運用されるのに伴い、APM システムも 24 時間運

*1 機械・プラント技術部交通システム設計課

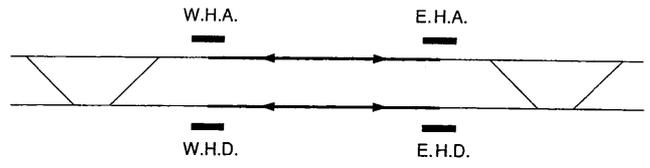
*2 機械・プラント技術部次長

*3 機械・プラント技術部機械・プラント制御設計課主務

W.H.A. : West Hall Arrivals 駅 W.H.D. : West Hall Departures 駅
 E.H.A. : East Hall Arrivals 駅 E.H.D. : East Hall Departures 駅



(a) 通常時のピンチドループ運行モード



(b) 閑散時のシャトル運行モード

図2 運転モード APMシステムの基本的な運行モードを示す。
 System operation mode

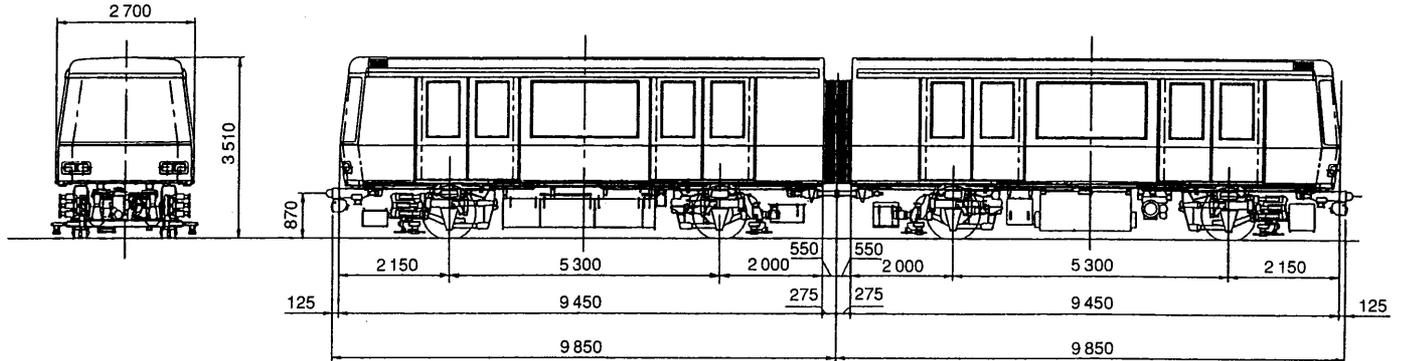


図3 車両編成 車両は2両固定編成としている。
 Configuration of vehicle

行される。一方では、時間によって輸送需要に変動が生じる。これらに対し、ピーク時間帯には4編成を線路に投入しループ運転し [図2 (a)参照]、深夜等の閑散時間帯には2編成でデマンドによるシャトル運転する [図2 (b)参照] ように運行モードを設定した。さらに、車両、電力設備、軌道等のサブシステムの保守や故障に対処するため、このほかに5つの運行モードを設定した。これらの運行モードは、いずれもATCによる全自動無人運転が可能であり、投入車両数の変更を始めとする運行モードの変更は、中央運転指令室でのCRT操作により自動的に行えるようになっている。このような柔軟な運行モードの設定・選択と各サブシステムの信頼性向上により、APMシステムとして高い稼働率 (FTA結果99.9%) を達成できるように計画されている。

注) ATC : Automatic Train Control ATS : Automatic Train Supervision
 ATP : Automatic Train Protection SSI : Solid State Interlocking
 ATO : Automatic Train Operation FTA : Fault Tree Analysis

3. APM 車両の開発

3.1 APM 車両の概要

APM 車両は、これまでに納入してきた国内のゴムタイヤ式新交通システム車両を基本に、空港内旅客輸送に適合するように改良、設計変更を加えたものである。車両の編成図を図3に示す。また、車両の主要諸元を表2にまとめる。

編成は2両固定編成で、最大3編成まで併結し全自動無人運転が可能である。車両寸法は、国内新交通システム車両を基本に、システムの輸送量、車内居住性の向上等を考慮して大型化し、編成当りの定員を152名とした。

車体は、軽量化のためアルミニウム合金溶接構造とした。台車は側方案内方式のステアリング台車で、駆動装置を持つ動台車と駆動装置を持たない従台車があり、各車両に動・従台車を1組ずつ装備している。車両は、このたび新設した社内試験線において、形式試験と全自動無人運転での800 km 連続走行を行い、その性能と信頼性を確認した。

3.2 車上 ATC システム

車上 ATC システムの構成を図4に示す。

表2 車両の主要諸元
 Specification of vehicle

項目	諸元
編成	2両固定編成
定員 (人)	76 (内座席5)/両×2両
自重 (tf)	11.8/両
車両寸法 (mm)	長さ9850×幅2700×高さ3510
案内方式	側方案内2軸4輪ステアリング方式
電気方式	3相交流600V, 50Hz
軌間 (mm)	軌間1700, 案内面間隔2800
車両性能	最高速度70 km/h 加速度 3.5 km/(h·s) 減速度 常用最大3.6 km/(h·s) 非常 5.4 km/(h·s)
制御方式	可逆式サイリスタレオナード制御 (応荷重装置・回生ブレーキ付き)
ブレーキ方式	電気指令式電磁直通空気ブレーキ (保安ブレーキ、駐車ブレーキ付き)

3.2.1 自動運転装置

自動運転装置は、国内新交通システムの方式に準じ、以下の装置で構成している。

(1) ATO 車上装置

ATP受信器から与えられるATP信号に基づき、目標運転速度の設定を行い定速運転制御を行う機能と駅ATO制御車上装置で受信した地点信号を基に、定位置停止を行う機能を有している。本APM車両では、3.4節に示すように定位置停止精度向上策を講じた。

(2) 駅ATO制御車上装置

各駅ごとに設置された地上装置からのドア制御指令を車上アンテナで受信し、さらに駅部において車上から列車の制御状態信号を送信する機能を有している。

(3) ATO データ伝送車上装置

中央指令所と列車間で交信し、中央指令からの制御指令を各種装置に伝送するとともに、車上からは各装置の動作と故障等の状態情報を中央指令へ送信する機能を有している。

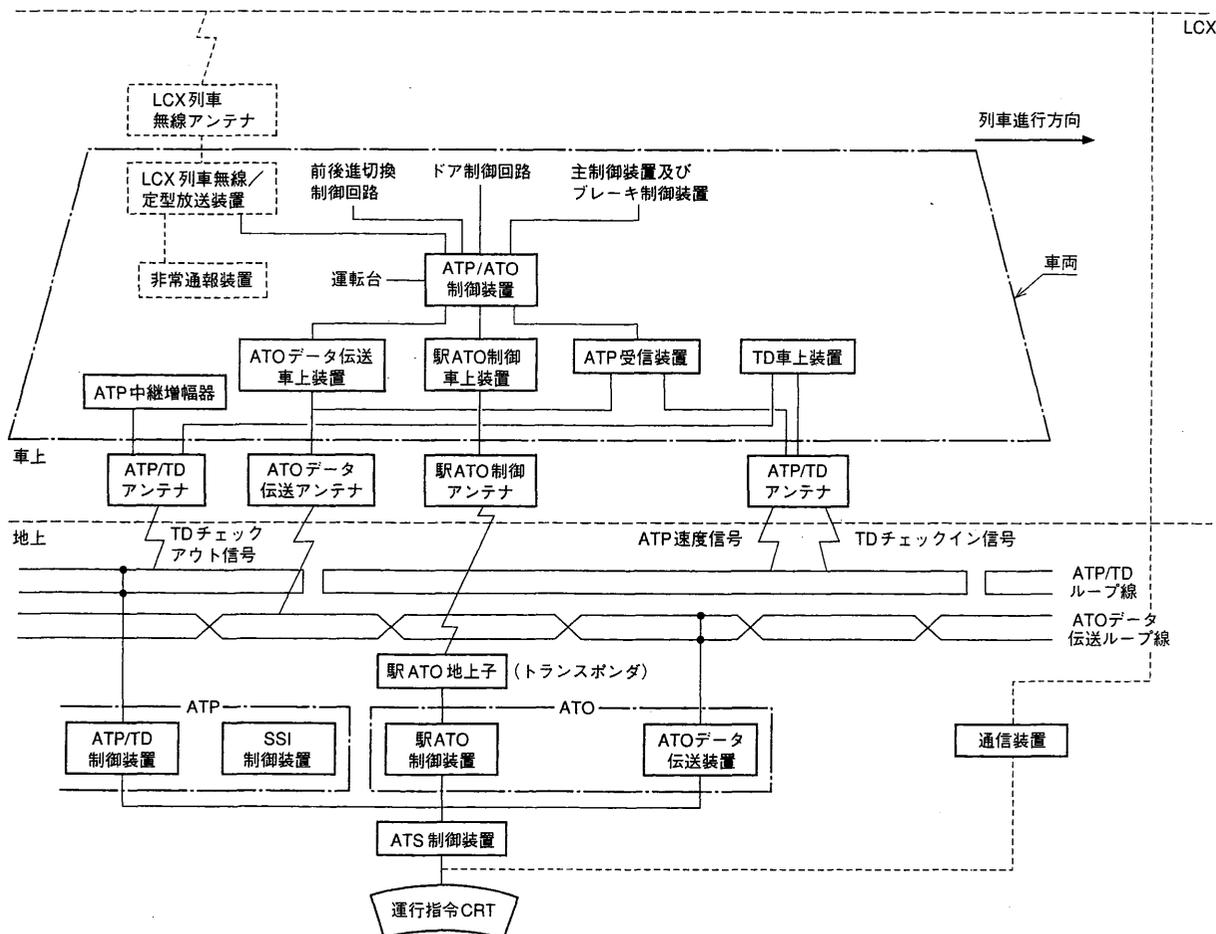


図4 車上ATCシステム構成 車上ATCシステムの構成と地上ATCの関連を示す。
Block diagram of on-board ATC system

3.2.2 保安装置

保安・通信装置は、国内新交通システムに準じている。

(1) ATP装置

地上に連続的に設置された誘導ループに送信される制御速度信号を車上アンテナで連続的に受信・解読し、ATP制御装置に対し列車の速度制限や停止等の情報を与える方式である。さらに、本APM車両では、従来、駅ATO装置等の機能としていた車両の進行方向の切換及びドアの開閉サイドの区別についても、保安性向上のためATP装置の保安機能に組み入れた。

(2) TD車上装置

ATP地上装置に対し列車の在線位置情報を与えるもので、連続送受信式である。

3.2.3 通信装置

列車無線は、LCX方式を採用している。また、非常時には乗客が中央指令所と連絡・通話ができるように、各車両に2箇所非常通話装置が設けられている。

以上の車上ATCシステムについては、社内試験線において、地上-車上結合試験及び自動運転走行試験を行い、その機能と性能について所期の目標値を達成していることを確認した。さらに、地上系を含めたATCシステム全体のソフトウェアに対して、(財)鉄道総合技術研究所からIEC1508 [Functional Safety: safety-related systems (part 1 to 7)] に準拠した安全審査を受け、その安全性について確認をいただいた。

3.3 オーバースピードプロテクション

本APMシステムでは、運転保安システムとして地上系保安システムのATP方式を採用した。さらに、運転保安システムの冗長

性の向上と列車運転間隔の短縮のために、新たに車上系の運転保安システムとして、オーバースピードプロテクション (Over Speed Protection) 機能を追加した。図5にオーバースピードプロテクションの概念図を示す。

図5に示すように、車両の走行する路線は保安上一定の区間 (閉そく区間) に固定分割され、その各々に対し列車間の相対位置関係及び曲線等の路線上の制約に基づきATP信号 (制限速度信号及び停止信号) が与えられる。車両は、地上側から受信したこのATP信号に従って自動運転される。先行車両の後方区間には、停止信号 (0信号: 01あるいは02) が与えられる。後続車両が01信号区間に進入した場合、車両はATPブレーキ [常用最大減速度 $3.6 \text{ km}/(\text{h}\cdot\text{s})$] で減速・停止し、また、02信号区間に進入した場合、車両は非常ブレーキ [減速度 $5.4 \text{ km}/(\text{h}\cdot\text{s})$] で減速・停止するように機能を設定している。また、車両が速度信号に従って定速走行中にATP信号を超えた場合、常用最大ブレーキによりATP信号以下まで減速される。これらの保安機能は、地上系のATPによるものである。しかしながら、このような固定閉そくに基づくATP方式では、先行車両と後続車両の間に常に車両のブレーキ性能から求められる固定の保安間隔を設けることになり、結果として高密度運行の妨げとなる。

これに対し、本システムでは図5に示すように地上側からのATP信号の外側に非常停止パターンを設定した。これは、ATP01信号区間に進入後、車上の制御装置に非常停止パターンを発生させ、このパターンに対し自車の走行距離と速度からこのパターンとの抵触の有無を照査し、抵触した場合、非常ブレーキを作動させる機能である。非常停止パターンは、ATP0信号区間で車上ATP制

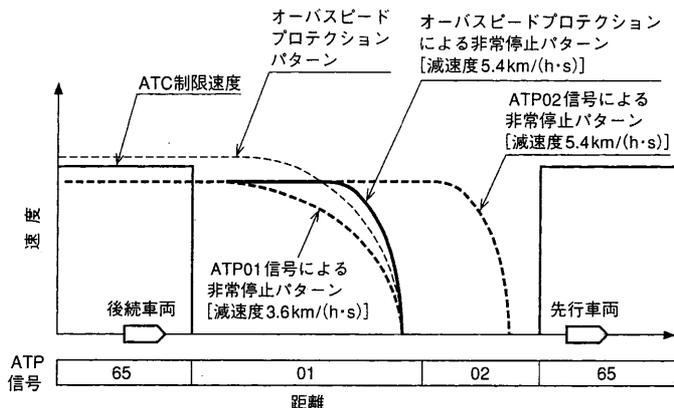


図5 オーバスピードプロテクションの概念 ATP 01 信号区間においてオーバースピードプロテクションパターンに抵触した場合でも、所定の停止位置に非常停止する。オーバースピードプロテクションを設けた場合 ATP 02 信号区間は省略される場合もある。
Concept drawing of over speed protection

御装置内に発生させ、01 信号により車両が所定の ATP ブレーキで減速しなかった場合でも、非常ブレーキによって ATP ブレーキによる所定の停止位置に停止するように設定している。同時にまた、ATP 制限速度信号区間においては、制限速度上にさらに絶対制限速度ラインを設定し、車両速度がこのラインを超えた場合、非常停止する [減速度 5.4 km/(h·s)] 機能も付加した。これらの車上制御系による運転保安システムをオーバースピードプロテクションという。

以上のように、従来の ATP 機能にオーバースピードプロテクション機能を付加することにより、全自動無人運転においてより安全にかつ高密度運転が可能となった。本機能についても社内試験線において検証試験を行い、その結果から香港新空港向け APM システムにおける最小運転間隔約 100 s の実現の確認を得た。

3. 4 停止精度の向上

無人で自動運転される車両にとって、駅に正確に停止することが必要条件である。香港新空港向け APM システムでは、客先仕様として σ (68.3%の発生確率) で 150 mm, さらに車両の出入口ドアと駅のプラットフォームドア間の許容偏心量から 3σ (99.7%の発生確率) で 300 mm の停止精度が要求された。

図6は、駅での車両の自動停止パターンを示したものである。 P_1 点 (停止位置の手前約 250 m) を通過後、車両の自動運転制御装置に、定められた停止位置 (定点) までの停止パターンを発生させる。車両は、車上で検知した速度と走行距離に基づき、所定の停止パターンで減速・停止制御される。途中、 $P_2 \sim$ 定点では駅 ATO 装置のトランスポンダによる絶対位置を検知し、停止制御を補間している。

このような従来の停止制御に対し、停止精度に関係する要因の分析とその寄与度についてシミュレーションした。その結果に基づき、表3に示す停止精度向上策を実施した。

図7に停止精度の分布を示す。実線が、対策後の停止精度シミュレーション結果 (設計値) であり、ヒストグラムが社内試験線での停止精度実測値である。これから表3に示す停止精度向上策により、所定の停止精度の 3σ (99.7%の発生確率) で 300 mm (図7に示す社内試験では 195 mm) が達成できたことが分かる。

4. む す び

1998 年春、香港新空港が開港する。同時に、当社にとって初めての APM システムも運用を開始する。本報に APM 車両の概要と

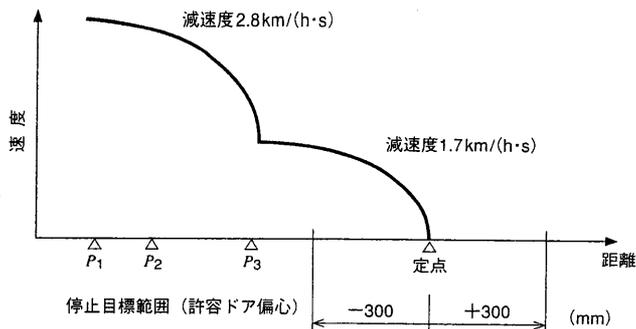


図6 車両自動停止パターン 駅停止時の車両の減速・停止パターンを模式的に示す。車両は2段階のパターンに従って自動で減速・停止制御される。
Train automatic stop control pattern

表3 停止精度向上策

Improvement of stopping accuracy

要因	対策
速度及び距離検出精度	速度センサ出力の全波整流方式への変更による速度分解能の向上 タイヤ径自動補正機能の追加による正確な距離・速度の把握
絶対位置検知精度	地点信号入力にキャリヤディテクト方式採用による地点位置の正確な把握
ブレーキ制御精度	転動防止ブレーキノッチの可変化による停止直前の木目細かなブレーキ制御

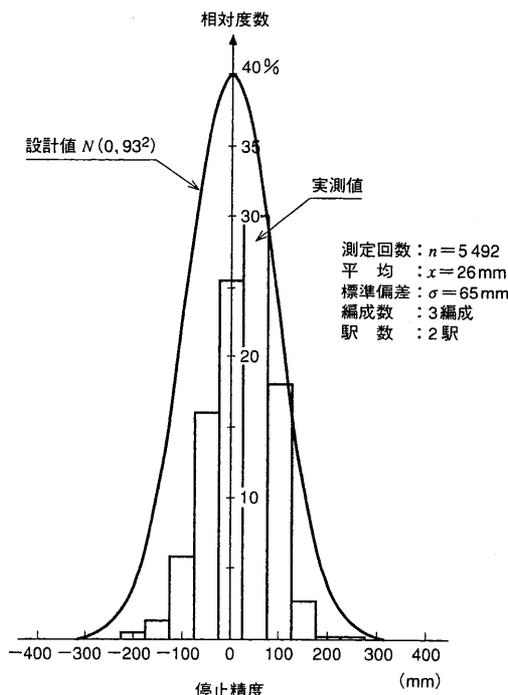


図7 停止精度実測結果 社内試験線での停止精度測定結果をヒストグラムで示す。本図から、目標の $3\sigma=300\text{mm}$ に対し 195 mm ($=65 \times 3$) と良好な結果であることが分かる。実線は設計値。
Result of measuring of stopping position

開発についてその一部を紹介した。現在システムの最終調整中であるが、今後の運用開始までより完成度を高めるよう尽力する所存である。そして新空港開港後多くの人々に利用され、輸送システムとしてその所期の目的を達成することを強く願う次第である。最後に、本 APM システムの完成に当り、サブシステムの供給等共に尽力頂いた関係各社に深く謝意を表します。