

シンガポール地下鉄 SMRT － C151 主回路更新改造－

生産本部 技術部



図 1 主回路更新工事後の C151

1 はじめに

地球温暖化が進む今日において、環境保全意識が世界中で高まり、省エネ、CO₂排出削減、低炭素社会を目指す国と地域が増えている。このような背景のもとに、当社はシンガポールにおいて、消費電力の削減を目的とした車両更新工事のプロジェクトに参画した。

1987年に、日本連合4社がシンガポールLTA（SMRT（Singapore Mass Rapid Transit）社が運営）に納入したC151形式396両（6両×66編成）において、DC主電動機をAC PMSM（永久磁石同期電動機）に載せ替えを行なう。

まず、最初2編成の施工後、試験運用にて信頼性、省エネ、メンテナンス性の効果を確認し、結果が良好な場合、残りの64編成も交換する。

2015年10月現在、改造・性能試験が終了し、SMRTに了承され、受け取りされた。この最初に改造された2編成は、東西線支線のチャンギ空港線に投入され営業運用された後、現在は東西線本線で営業運転を開始している。

2 本案件における当社の担当業務

本案件は、機器の提供と実際の工事は、現地の施工会社であるSMT社が担当する。当社は主回路の更新に伴

う床下改造設計と現地施工の指導を担当した。

当社は2014年9月から2015年4月にかけて、改造工事が行われたシンガポールSMRTビシャンデポにて、施工会社のSMT社に対して、施工指導とアドバイスをを行ってきた。

当社は主回路システムの更新改造工事の車両メーカー責任として、具体的な改造工事の立案から最終的な走行試験における性能検証までのすべてに関わることでその責任を果たした。

3 システム構成

3. 1 概要

編成としては、4M2Tの6両で構成され、その内の4Mの主回路システムはチョップパ方式の主回路装置とDC主電動機の構成であったが、今回の改造工事で主回路システムのみ駆動システムに永久磁石同期電動機（PMSM）で全密閉・自冷式の冷却方式を用い、VVVFインバータ装置の構成に改造した。

改造前のチョップパ方式の主回路システムに比べ35%の省エネが達成することができた。

全体の構成によっては、最大39%の省エネも望める可能性がある。

3. 2 PMSMの採用メリット

1990年頃からIM（図2）誘導電動機（Induction Motor）が主流で採用されてきていたが、2000年代後半から更なる省エネ性能向上により回転子に永久磁石を利用したPMSM（図3）永久磁石同期電動機（Permanent Magnet Synchronous Motor）が採用され始めている。その理由としては、IMに比べ銅損や鉄損の損失が50%も改善される（図4参照）。このため定格効率は、標準的なIMの場合91%であるがPMSMは97%になる。よって装置としての軽量化も図れ、PMSMは低損失・高効率化といえる。



図2 IM（誘導電動機）
定格効率 91%



図3 PMSM（永久磁石同期電動機）
定格効率 97%

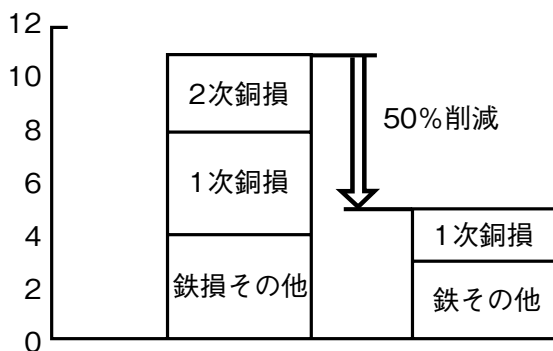


図4 IM と PMSM の損失の比較

3. 3 改造機器全体の比較

C151形投入当時のチョップ方式主回路システムの機器構成は、以下に示す。

- ① DC主電動機
- ② チョップ制御箱
- ③ フィルタリアクトル
- ④ 主抵抗器
- ⑤ ラインスイッチ箱（LB箱）

今回のPMSM採用の主回路システム機器構成は以下に示す。

- ① PMSM主電動機
 - ② トラクションインバータ
 - ③ フィルタリアクトル
 - ④ ハイスピードサーキットブレーカ箱（HSCB箱）
- 機器構成を比較しても軽量化となり、省エネにも繋がる。

3. 4 PMSMの主な特徴

特徴および効果としては、以下の4項目があげられる。

- ① 省エネ：主電動機の効率97%
- ② 主電動機の内部構造がシンプル
- ③ メンテナンスの容易化
- ④ 低騒音

3. 5 今回のPMSM主回路システム改造工事による確認および検査

主回路システム改造により、現行のブレーキシステムとのブレンディング調整および確認が必要となる。また今回はスリップスライドシステムの改善も図った。

主に改造前と改造後での車体検査（各部位の寸法確認）と定置での機能検査と確認ならびに試走線での性能検査・確認、最終的には本線での性能確認で項目を分けた。

3. 5. 1 改造前の検査・確認

- ① 質量・車体の各部位の高さおよびライナ寸法確認・検査
- ② 電氣的機能（室内灯・非常通報装置・放送装置スピーカ・空調装置等々）確認・検査

3. 5. 2 改造後の確認・検査

- ① 質量・車体の各部位の高さおよびライナ寸法確認・検査
- ② 各軸の輪重測定確認
- ③ 車両限界ゲージによる確認
- ④ 偏倚試験による周辺機器・部品との当り・スキとの寸法確認

- ⑤ PQ確認（横圧確認）
- ⑥ 今回作業していない機器装置の動作確認・検査
- ⑦ 主回路システムの動作確認・検査
- ⑧ 6両での編成における動作確認・検査
- ⑨ 試走での走行およびブレーキ装置とのブレンディング確認試験・検査
- ⑩ 試走線でのPMSM主回路システムの性能試験（力行およびブレーキ（回生・空気）で空車・満車）
- ⑪ 試走線でのEMC確認試験（図5）（保安装置，無線等の確認試験）
- ⑫ 本線での走行試験および性能試験（力行およびブレーキ（回生・空気）の確認試験走行時での加速度データ解析によるPQ確認）
- ⑬ 本線でのEMC確認試験（保安装置，無線等の確認試験）

主に以上の事柄を第1編成で確認をした。

第2編成からは，①～③，⑥～⑨項目の確認・検査をすることとした。



図5 試走線走行時の保安装置への影響確認風景

C151の改造後の試験では，デポでは他社製の新車納入や他の改造変更工事等々の関係で多くの作業が実施されていて，ピット線や試走線の取り合い状態が続いており，機能検査や走行性能試験の日程が立てられず試験が思うように進められなかったことが苦労した点の一つである。

4 ギ装

4.1 機器更新の概要

受注した改造設計の部位はPMSM化に伴う床下の改造である。改造前と改造後の床下機器配置を図14に示す。

主回路機器がチョップパ制御器からVVVF制御器に更新されたことにより省エネ化だけでなく機材の小型化軽量化が実現でき床下の更新工事には良い条件となった。

主回路制御機器以外の機器は変更されていない。ブレーキ制御器やコンプレッサなどの空圧機器を同一配置としていることは変更工事の軽減に寄与した。



図6 改造工事中のC151

4.2 ギ装の改造内容

主回路更新に伴う改造工事を施工するにあたり，改造する部分と既存の状態を維持する部分とのすみ分け，ならびに工作的にどの位置で縁切りするかなどの検討が現地調査が進むにつれて明確になっていった。

主回路ならびに制御回路の配線交換に伴う通線ダクトや電線管の交換，機器更新に伴う空気配管のルート変更，ならびに機器吊り金具の交換と機器の吊り直しが主要な改造工事の内容である。既存の箇所を残しながら細部に渡る地道な作業も多く見られた。



図7 機器吊り金具の平面度の確認作業



図8 VVVF インバータ制御装置の架装状態

4. 3 事前の施工指導

事前の図面説明会や調達品の詳細打ち合わせ、ならびに配管継手の作業デモンストレーションを当社横浜事業所で行なった。



図9 配管継手の作業デモンストレーション (J-TREC 横浜)

4. 4 ギ装材料とその調達

改造に必要なギ装材料には、電線、配管、ダクト類、鉄製ブラケット、その他の小物の板金物などがあり、これらは調達性を含めたコストダウンが図られた。シンガポールでの調達を基本とし、一部の部材を日本から送った。

電線はEN規格に適合し、なおかつシンガポールでの入手性の良い製品を選択した。

床下で使用する電気品の吊り金物を含む板金物は現地の加工業者にて製造された。金物の寸法精度を出す必要と、溶接品質を確保する必要から技能指導員を派遣し指導にあたった。



図10 溶接の指導風景

配管の加工においても現地の加工業者で加工を行なうことを前提に当社から指導を行なった。

加工の技量を要する配管部品の一部は、初期ロット分は当社で日本で用意したものを購入していただき使用した。アルミニウム製の配管継手や配管用の接地クランプなどの比較的寸法の要求が厳しく、また加工技術を伴うものがその対象品目である。



図11 配管の加工精度についての折衝風景

4. 5 改造図面の作成と現地施工

4. 5. 1 改造図面の作成

システム変更にあたり改造箇所を把握してから設計に着手し、改造図面作成に4ヶ月、その後の細部の図面調整に2ヶ月を要した。およそ半年の期間で200枚程度の改造図面の作成を行なった。詳細な加工を示す図面においては、国が違うことでの配慮も必要だった。作図にあたりSMT社が理解しやすくするための工夫や作図テクニックも要した。

4. 5. 2 改造図面と現地施工

改造図面において現地施工用として、詳細な配線系統図が描かれたことが最大の特徴として挙げられる。これはSMT社がシンガポールとその周辺国で現地人を採用し作業に当たらせるための図面で、通常日本では必要としない図面である。ここには、現場では図面が理解されないと作業は止まりがちとなるため、省略することなくより実態に近い形で配線図を描き、その図で説明し作業内容を理解してもらうという地道な努力があった。

また図面の見方の教育の他に、当社の作業指導員による、ギ装処理要領書に基づく配線・結線の作業指導も改造工事期間中に必要に応じて都度実施された。

図面においては一つの教訓として、文化の違いによる相互理解の重要性がある。シンガポールでは図面は一角法を用いており我々の三角法の図面では作業ができない。三角法で納めた図面で、一角法で作られたという苦い経験もした。

5 海外での改造工事における製品安全と品質確保

5. 1 改造工事における製品安全の作り込み

本案件において、当社は床下改造設計と施工会社への指導とアドバイスを行なった。

当社は、SMT社が製品安全を一連の改造工事作業のなかで作り込みができるように指導し、製品の品質確保

に努めた。

5. 2 事前調査

機器更新のための品質の高い床下設計と安全な施工作业が行なえるようにするために、当社技術部、生産部、海外営業部が、複数回現地に出向きC151の現車調査を入念に行なった。

改造対象車両のC151は旧東急車輛時代に設計製造に携わった経緯があり、結果、過去の設計資料に恵まれた。このことは事前調査の促進に非常に寄与したと言える。

5. 3 現地調達品の品質確認

改造工事に使用される大半の配管、配線、電材料などは、先にも述べたように、コスト面の関係から、施工会社のSMT社がシンガポール現地にて調達することが基本であった。

SMT社が調達した配管、配線、電材料などについては、鉄道車両に使用可能か、車両メーカーの視点で現物確認と品質確認を行なった。

5. 4 業務の習慣化の指導

SMT社に対して日本式の作業のやり方や業務の習慣化などの指導も行なわれた。一つの例であるが、仕事を始める前に日本式の朝礼を導入し、その日の予定の連絡、作業内容の確認、作業上あるいは安全面の注意事項等の連絡をSMT社の責任者が朝礼でスタッフ全員に伝達するようになった。

また作業工程表や作業の進捗管理表を作業場に掲示することによって、日々の作業進捗の状況を見える化するようにしたのも日本からの指導によるものである。



図 12 毎朝行なわれるようになった朝礼

5. 5 改造後の検査及び現車確認

トライアル第1編成、ならびに第2編成の改造施工が完了した後、図面通りに施工ができているか、また安全

と品質を作り込むことができているかなどについて確認するために、当社ぎ装設計、システム設計、検査課が現地へ出張した。

改造された現車の目視確認、ならびに検査結果から、第1編成、第2編成ともに大きな問題なく施工できていることを確認した。

6 おわりに

今回のシンガポールSMRT社向け主回路更新改造工事では、当社は床下の改造設計と現地工事の指導とアドバイスをを行った。設計から施工そして試験までの一連の受注業務をとどこおりなく完遂できた。

このような海外での改造案件が数多く存在することも知ることができた。今後において可能となれば現地作業者の教育を含め、本件のような受注業務を総合的に展開できればと考える。そういった意味で本案件は一つのビジネスモデルと位置付けできる。

今回のシンガポールにおける改造案件を通して、東南アジア地域において、日本の技術によるエコ化のプロジェクトの認知度が高まり、これを皮切りに、東南アジア市場の開拓が加速していくことに期待する。

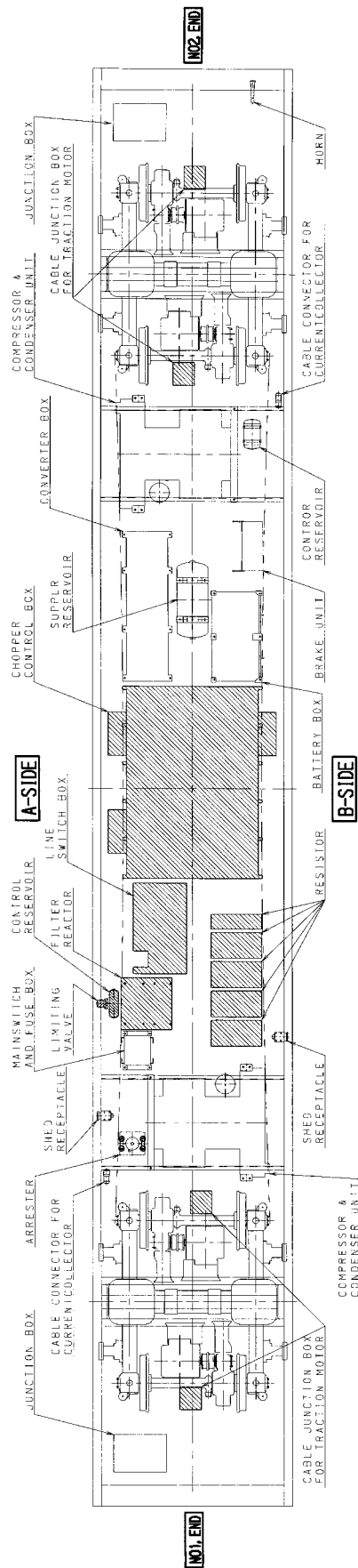


図 13 完成間近の車両の前での記念撮影

今後も国内外案件を問わず、エコ化の更新工事案件に積極的に取り組み、改造案件においても高品質で安全な製品の提供に努めることで鉄道車両のリーディングカンパニーを担っていきたい。

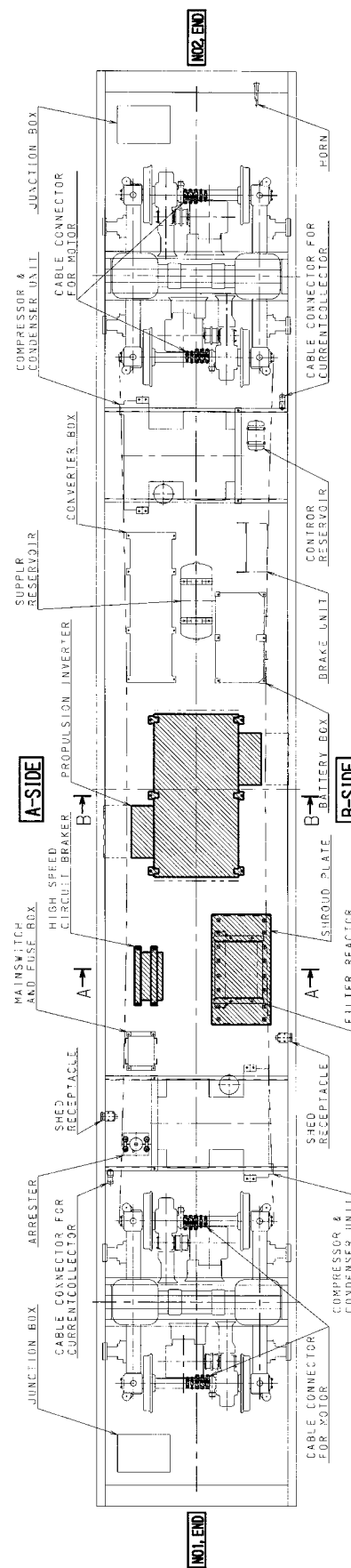
最後になるが、27年前のC151の受け取り検査のときにSMRTの検査担当だった人物との再会があり、今回もアテンド役で再びお世話になった。このご縁も大切にしたい。

(大野一男、鈴木久郎、宗 寿元 記)



改造前

(斜線部は撤去した部品)



改造後

(斜線部は搭載した部品)



断面 A-A

断面 B-B

図 14 改造前と改造後の床下機器配置