

(論文)

グリーンタイヤ予熱装置(GPH[®])

The Green Tire Pre-heating System (GTPS[®])



三田村久*
Hisashi Mitamura



岡田和人*(工博)
Dr. Kazuto Okada

Kobe Steel has developed a new green tire pre-heating system called GTPS. It is one of the leading forms of new tire curing processes. The GTPS process generates heat inside green tires, and pre-heats the tire before curing, which reduces the curing time and improves overall productivity. Kobe Steel has delivered several GTPS systems to its customers since 2001, and received excellent evaluations. This paper explains the development of this new technology.

まえがき = 近年、タイヤ製造プロセスにおける加硫工程への取組みとして、機械的には、精度向上はもとより様々な自動化がなされてきた。しかしながら、特にここ数年においては、生産性向上の観点から、加硫時間の短縮化を目指した種々の手法が試行され、活発な新製品開発が進められている。また、タイヤの加硫品質向上のため、加硫温度履歴の最適化についてもより高度な取組みがなされている。

当社は1950年代よりタイヤ加硫機の製作/販売を行ってきたが、本稿では新しいタイヤ加硫プロセスのひとつの提案として、加硫成形前の生タイヤ(以下、グリーンタイヤ)をあらかじめ内部から発熱させることで予熱し、タイヤ加硫時間の短縮及び加硫温度履歴の最適化を可能とするグリーンタイヤ予熱装置(以下、GPH)を紹介するとともに、当該開発技術について解説する。

1. タイヤの構造と従来加硫方法

図1に、乗用車用タイヤ(以下、PCタイヤ)及びトラックバス用タイヤ(以下、TBタイヤ)それぞれの断面構造を示す。図中、白抜き部分は金属部材、グレーパターン部は非金属部材に相当する。

一般的なラジアルタイヤは以下のように構成される。
カーカス：タイヤの骨格の役割を持ち、スチールコードあるいは繊維コードよりなる。トレッド部：主に路面に接する部分であり、内部にスチールコード(一般的に素線径 0.2~0.4mmの燃線)で構成されるベルト層を有している。スチールコードは、タイヤ周方向(走行方向)に対して10~20度の走査角度をもって配置されている。また、タイヤ表面はトレッドパターンなる溝が形成される。ショルダ部：トレッド部とサイドウォール部の間に位置するタイヤの肩の部分である。タイヤ旋回動作時に最も荷重を受ける部分のため、肉厚ゴムにて形成

されている。サイドウォール部：タイヤの側面であり、メーカー名やタイヤサイズなどが刻印されており、路面からの振動を吸収する部位である。ビード部：タイヤをホイールに固定している肉厚部位であり、内部にはビードワイヤと呼ばれるスチールコード(一般的な素線径として1.0~1.5mmのスチールコードが周方向に幾周も巻かれている)を内装している。

ここで、従来のタイヤ加硫法について説明する。各種生ゴムと各種補強部材によってドーナツ状に成形されたグリーンタイヤは、タイヤ加硫機に装着された金型内に挿入される。グリーンタイヤは、ブラダと呼ばれるゴム袋によって内面から保持されるとともに、ブラダ内に供給される圧力によって金型内面に押しつけられると同時に、内外面からスチームなどの熱媒体で加熱される。所望の時間が経過すると、タイヤ全体に加硫反応が進行し、弾性のあるゴムに変化し加硫成形が完了する。このため、熱拡散率の小さなゴムからなるタイヤにおいては、ショルダ部やビードフィラ部(図1参照)に代表さ

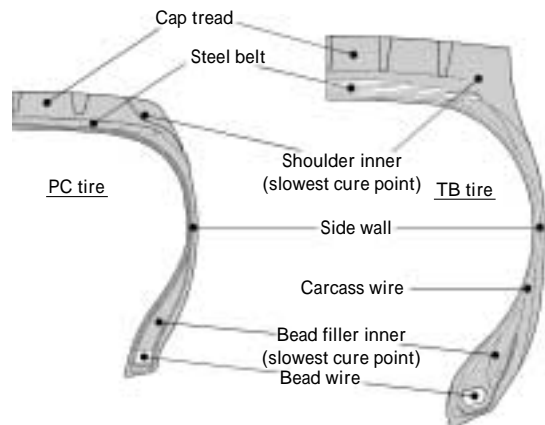


図1 タイヤの構造
Fig. 1 Structure of tire

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械技術部 **技術開発本部 機械研究所

れる肉厚部位内部の昇温が遅れ、タイヤ加硫成形に要する時間が長くなり、タイヤ製造プロセスの律速工程となっている。

また、グリーンタイヤは、各部位の機能及びタイヤ加硫時の温度履歴を加味したコンパウンド構成となつてはいるものの、各部の加硫量は必ずしも一様でない（表面では加硫が進行、内部では加硫量が低い）。例えば、サイドウォール部表面は加硫過多により、紫外線に対する耐候性が低下してしまうなどの問題が生じている。

2. 内部予熱への誘導加熱の適用とその効果

上記問題点解決のため、加硫前のグリーンタイヤをある温度以上に加温しておくというアイデアはこれまでもあった。例えば、グリーンタイヤ全体をオープンで予熱することも試みられたが、予熱時間が加硫時間以上となる、グリーンタイヤ全体を予熱するためタイヤ自体の剛性が低下し、その後のハンドリングが困難、部材間剥離が生じるなどの問題が生じ、実用化拡大には至っていない。

そこで、本開発においては、タイヤが補強のための金属部材とそれを囲むゴムからなるという特徴に注目し、グリーンタイヤの予熱に誘導加熱を適用し、最も加硫が遅れるショルダ部、及びビードフィラ部を選択的かつ効率的に予熱する装置を開発した。図2にグリーンタイヤ誘導加熱の原理図を示す。誘導加熱の原理は、最近一般家庭に普及しているIHクッキングヒータと同様に、ワークコイルに高周波電流を流すことにより生じる交番磁界を、被加熱物に印加することで渦電流を生じせしめ、そのジュール損により非接触にて加熱するものである。

まず、誘導加熱による予熱の効果を定量的に予測するために、2次元数値解析にて、等価加硫量（基準温度と基準時間における反応量の何倍になっているかを表す量）の見積もり、誘導予熱による加硫時間短縮率の評価を行った。計算では、タイヤ初期温度 30℃、スチールベルト部の誘導加熱温度上限値 100℃、金型温度 170℃、内圧スチーム温度 190℃、ブラダ厚さ 5mm、タイヤ、ブラダの物性値は一様とし、熱伝導率 0.37W/m・℃、比熱 1.3e+3kJ/kg・℃、密度 1.15e+3kg/m³とした¹⁾²⁾。図3には、この解析より、律速部における誘導予熱の効果を等価加硫量から見積もった結果を示す。ここで、等価加硫量は下記の式(1)より求めた³⁾。

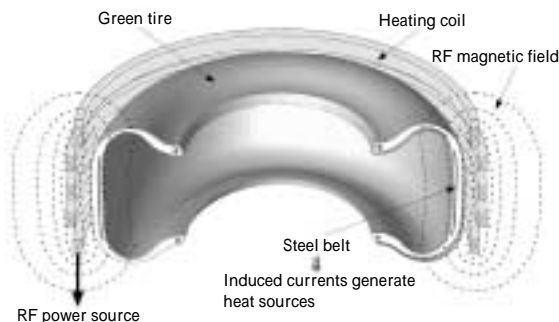


図2 グリーンタイヤの誘導加熱原理
Fig. 2 Principle of induction heating for green tire

$$ECU = \exp\left\{-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\} t / t_0 \dots\dots\dots(1)$$

- ここで、 ECU : 等価加硫量 (-)
 E : 活性化エネルギー (kJ/mol)
 R : 一般ガス定数 (kJ/mol・K)
 T_0 : 基準温度 (K)
 T : 加硫温度 (K)
 t : 加硫時間 (s)
 t_0 : 基準時間 (s)

ただし、基準温度は 141.9℃、活性化エネルギーは 89.1kJ/mol・K、基準時間は 60s とした。

加硫終了直後の等価加硫量に基づく、誘導予熱の付与により 12.4%加硫時間を短縮できることが見込まれ、非常に効果の大きいことが推測できる。

さらに、タイヤ厚さ方向温度の標準偏差の履歴を図4に示す（ここで、数値計算での分割格子数を母数とした）。従来法ではタイヤ表面からの加熱となるため、加硫開始直後に標準偏差は最大値をとり、以後収束する。他方、誘導加熱により予熱することで、標準偏差の最大値は半分程度に抑えられ、タイヤ厚さ方向の等価加硫量分布の均一性向上が期待される。

図5には、TB タイヤにおける誘導予熱の効果について、2次元数値解析にて予測した結果を示す。トレッド部、ショルダ部及びビードフィラ部の各肉厚部が誘導予

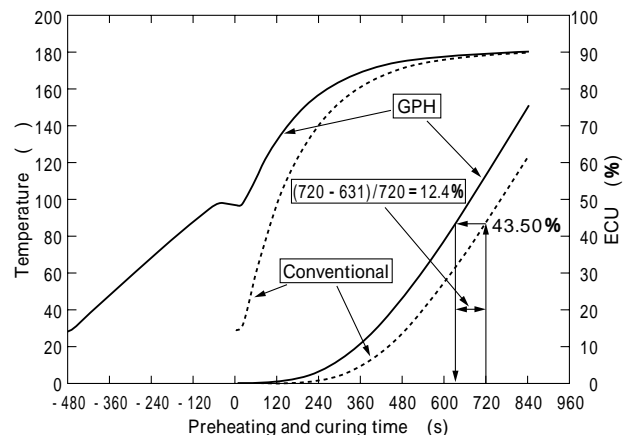


図3 数値解析による律速部の等価加硫量評価に基づく誘導予熱効果の予測

Fig. 3 Prediction of GPH effect based on ECU at slowest cure point by numerical evaluation

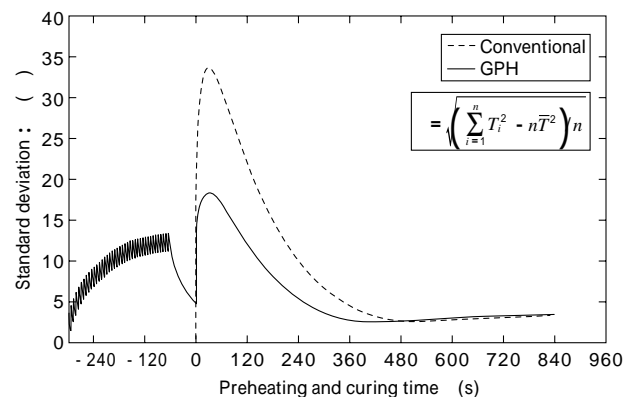


図4 タイヤ厚み方向温度分布の標準偏差履歴
Fig. 4 Transient curves of standard deviation on thickness-directional temperature distribution

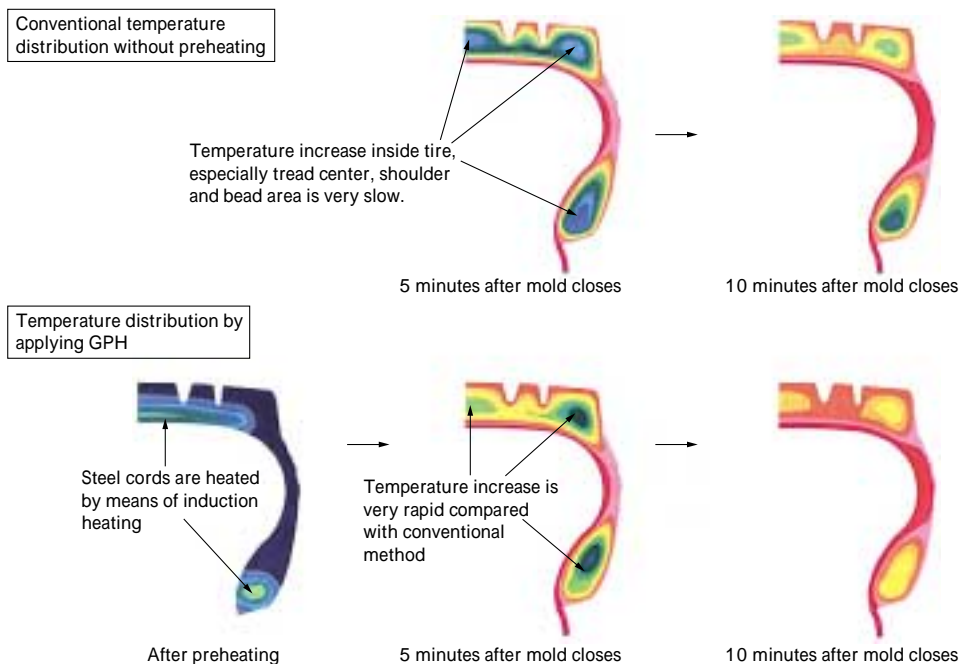


図5 TB タイヤの2次元伝熱解析
Fig. 5 Two dimensional heat transfer analysis of TB tire

熱の付加により、速やかに昇温する様子が確認できる。等価加硫量に基づく加硫時間短縮効果は15%を越え、加硫成形サイクルの短縮による生産性向上が大きく期待できる予測となっている。

3. グリーンタイヤ予熱装置 (GPH) の概要

ここで装置の概略構成について説明する。図6にPCタイヤ用GPH試用機、図7にTBタイヤ用GPH生産ライン機を示す。本装置はタイヤ加硫成形プレス(以下、タイヤ加硫機)の直前に配置され、加硫前のグリーンタイヤが供給された後に予熱を施し、次工程となるタイヤ加硫機へ予熱の完了したグリーンタイヤを受け渡す形態となっている。成形工程から搬送されてくるグリーンタイヤは、一旦供給ポジション上へ載置(ストック)された後、タイヤ加硫機の生産サイクルに合わせて予熱ポジションへ移送される。移送後は上下のリムによって気密保持され、内部にインフレーション用エアが導入されることによって形状保持される。また、誘導加熱用ワークコイルはタイヤ外周上の1箇所に配置され、トレッド部あるいは上下ビード部に対向配置されている。

予熱中、グリーンタイヤは回転機構により自動動作するとともに、形状保持のためショルダ部がサポートローラによって支えられている。また、予熱温度は非接触の温度センサによってタイヤ内外表面の温度をモニタリングすることにより、管理、コントロールされている。さらに、誘導加熱用高周波電源は装置機側あるいは専用ラックにて別スペースに配置され、タイヤ加硫機前スペースを占有することがないように配慮されている。

4. 装置の特徴

4.1 繰り返し再現性の高い温度コントロール方法

グリーンタイヤの最高温度到達部となるスチールベルトを所望の温度に予熱するため、非接触の温度センサに

てモニタリングしているインナライナ表面温度を制御変数としている。自転するタイヤの内側から、センサヘッドを鉛直方向に首振運動させることで、スチールベルトが埋設されている範囲全体をセンシングしている。また、タイヤは放射率が1に近く、比較的低い温度でも精度良い温度測定ができる。温度制御法として、あらかじめ、誘導予熱の条件出し時にスチールベルトの温度を熱電対により計測し、所望の温度履歴となるように決定したパラメータにて高周波電源の出力をPI制御するか、同様の計測で、タイヤ品種ごとに高周波電源のPI制御出力履歴を記憶しておき、同サイズタイヤの連続生産時において投入電力を同一とする、いわゆるティーチング制御の2方法が選択できる。図8には、TBタイヤにおけるPI制御時のインナライナ、スチールベルト(B4:最外層)の温度履歴を示す。インナライナに比べ、スチールベルトは最大で20程高くなるが、オーバヒートすることなく目標温度まで予熱することが可能である。なお、TBタイヤのビード部については、ビード表面温度をモニタリングして同様の加熱制御を行っている。

4.2 磁場漏洩対策による安全性の確保

電磁界の曝露制限に対するガイドラインは、例えば時間変化する電界及び磁界への職業的曝露に関する参考レベルとして、0.82~65kHzの周波数では電界強度:610V/m、磁束密度:0.307Gとされている⁴⁾。本誘導予熱装置におけるガウスメータによる実測値は、運転中に作業者がワークコイルに近づく最短距離500mmにおいて0.083Gと、ガイドラインを十分満足する値となっている。

これは、個々の電源容量が、2章で述べたとおり3~5kWと家庭用のIHクッキングヒータなみであること(作業員からワークコイルまでの距離は、IHクッキングヒータに比べ遠い)、加熱の不要な領域に磁力線が飛ぶことのないよう磁気シールドを施しているためである。

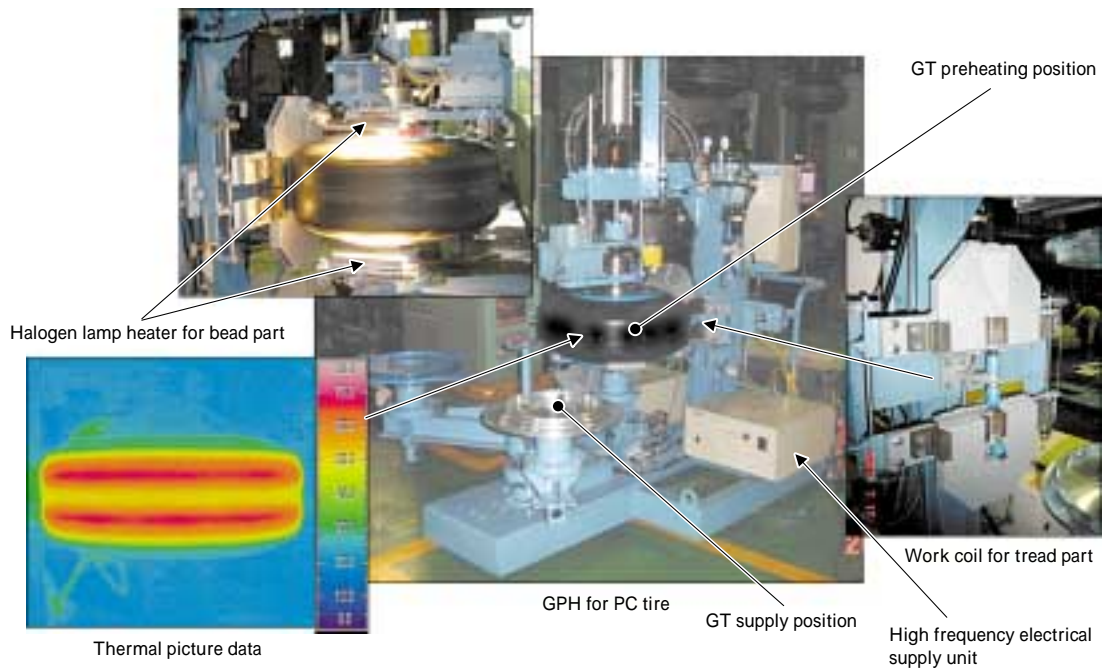


図6 タイヤ用 GPH デモ機
Fig. 6 Demonstration machine of GPH for PC tire

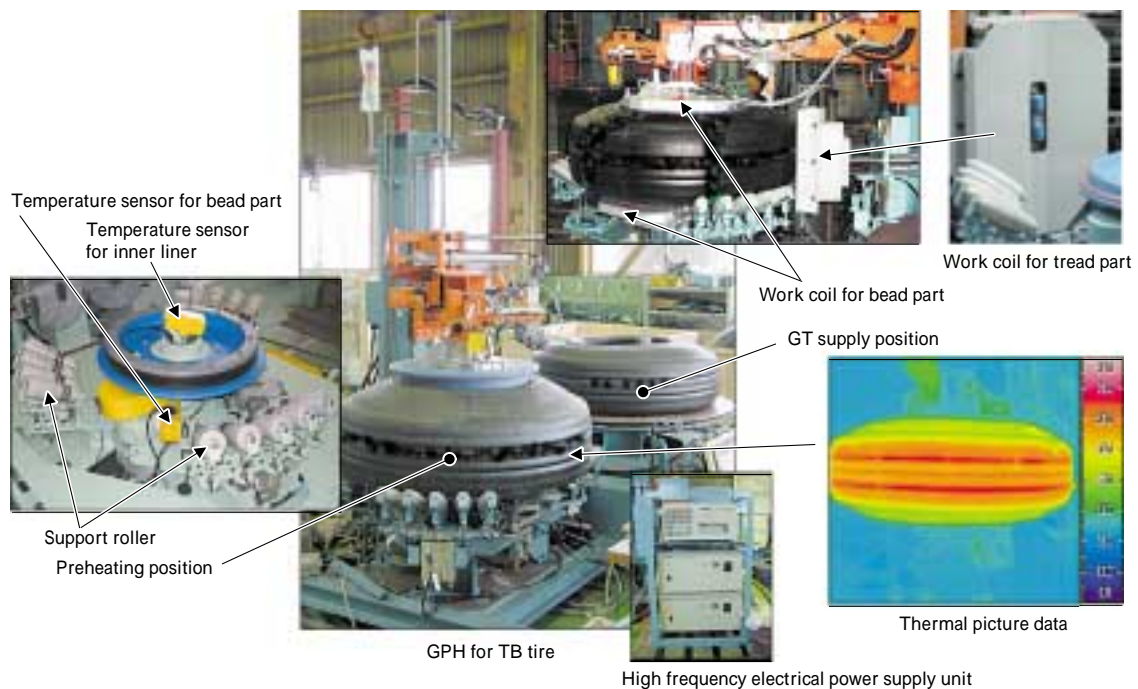


図7 TB タイヤ用 GPH 生産機
Fig. 7 Production machine of GPH for TB tire

4.3 肉厚ビードフィラ部及びサイドウォール部を持つ PC/LT タイヤへの適合性

PC タイヤあるいは LT タイヤ(ライトトラックタイヤ)の中には、ビードフィラ部やサイドウォール部が肉厚で、ショルダ部と同様に加硫律速になる種類もある。この場合は TB タイヤと異なり、ビードフィラ部やサイドウォール部のカーカスコードは繊維材料であり、誘導加熱を適用することができない。そこで、本予熱装置では、このような PC タイヤあるいは LT タイヤ用として、律速部(ビードフィラ部あるいはサイドウォール部)の予熱源にハロゲンランプを採用したタイプも取揃えてい

る。図6には、ハロゲンランプによるビードフィラ部の予熱状況を示す。スチールベルト部の誘導加熱と同様、上下ビード部表面温度を IR センサでモニタリングし、PI 制御で所望の温度まで昇温コントロールしている。

5. GPH の効果確認試験結果

デモ機を用いてのユーザにおける予熱効果を、表1にまとめて示す。予熱の効果は各タイヤサイズにより差があるものの、数値解析による予測どおり加硫時間は確実に短縮されている。特に TB タイヤにおいては、加硫時間を短縮することにより、サイドウォール部の加硫過多

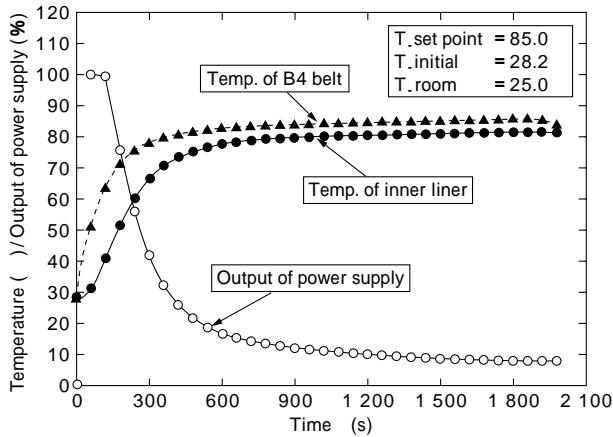


図8 TB タイヤにおけるPI制御時の各部の温度と高周波電源出力履歴

Fig. 8 Transients of temperature and output of IH power supply during PI control for TB tire preheating

が低減されるので、サイドウォール部の耐候性向上が望め、リキャップ(タイヤケースを流用してトレッドゴム部のみを貼換えし、再生利用する)回数の増加が期待できる。また、トレッド部においても、厚さ方向における加硫量偏差を少なくできることで、より耐久性に優れた適正加硫量の設定が可能となる。

さらに、GPHの付加的な効果の一例として、図9にスチールベルト部とトレッドゴム接着界面における断面TEM(Transmission Electron Microscope)観察事例を紹介する。GPHを適用した場合には、接着界面においてCuSの結晶成長が確認され、この観察結果からトレッドゴムに対するアンカ効果が期待できる。実際、剥離強度試験においてもその効果が確認されている。

むすび = GPHの特徴と効果、これまでの試験結果などについて紹介した。今後の展開として、加硫時間短縮効果が大きく見込め、ユーザにおいても装置導入への優先順位が高いTBタイヤ、ORタイヤ(建設車両用大型タイヤ)において、生産ラインへの本格導入を期待したい。また、PCタイヤにおいても、特にミニバン、RV車用などに代表される肉厚トレッド部を有するタイヤ、ランフラットタイヤなどのサイドウォール部の厚いタイヤなど、効果の大きく見込めるタイヤ種に的を絞って、積極的なアプローチを展開していく予定である。しかしながら、本装置の適用対象となるタイヤは、長期間にわたる各種品質、性能評価が課せられるため、いかに評価の信頼性を確保し、かつ、評価期間を短縮できるかが今後の

表1 加硫時間短縮結果

Table 1 Results of cure time reduction

	A	B	C	D
Tire size	315/80R22.5	11R22.5	205/60R15	185R14
Cure reduction rate (%)	15.2	14.8	8.3	15.6

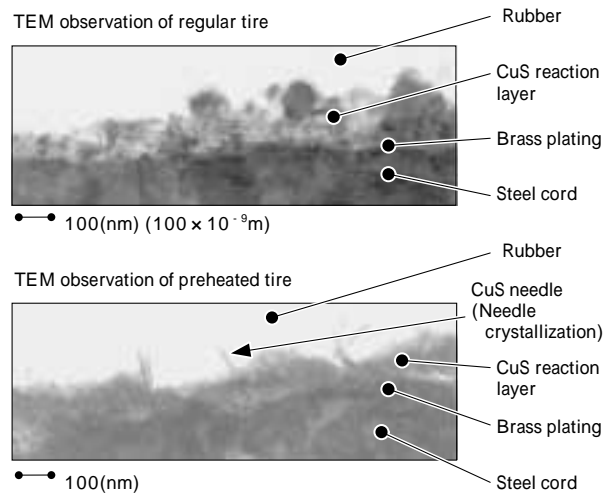


図9 スチールコードとゴム接着界面のTEM観察

Fig. 9 TEM observation of between steel cord and rubber layer

課題といえる。

現在、評価用機及び生産機としてTBタイヤ用GPHを国内外で複数台納入しており、またPCタイヤ用GPHに関しても評価用機が試用中にある。当社工場に設置されているデモ機を用いての評価テストなども随時実施されており、今後もユーザ側へ当装置を積極的に紹介するとともに、さらなる性能向上に努めたい。

参考文献

- 1) 日本機械学会編：伝熱工学資料，改訂第4版(1986) p.321，丸善．
- 2) J. P. Holman: Heat transfer, 6th edition(1986) p.491, McGraw-Hill.
- 3) 有松利雄：日本ゴム協会誌，Vol.59, No.3 (1986) p.129.
- 4) 国際非電離放射線防護委員会：時間変化する電界、磁界及び電磁界による曝露を制限するためのガイドライン，(1998) p.27.