

超電導モータの設計

馬場 猛*・尾山 仁・有吉 剛
澤井 孝典

Design of Superconducting Motor — by Takeshi Baba, Hitoshi Oyama, Takeshi Ariyoshi and Takanori Sawai —
The features of superconductivity, such as zero electrical resistance and a high current density, enable excellent power efficiency and high magnetic fields which normal conductivity would never generate. Thus superconductors have the potential to be used in high-performance electrical equipment. The authors, at Sumitomo Electric, developed the world's first electric car powered by a superconducting motor. They also found that the best performance was obtained when the superconducting motor was driven in a low-speed, high-torque. In this study, the authors designed a new interior permanent magnet (IPM) motor (maximum torque: 3,120 Nm, rotation speed: 2,000 rpm) using DI-BSCCO® and measured the mileage based on the electromagnetic analysis. This paper describes the details of the study, including the key to AC loss reduction.

Keywords: superconducting wire, motor, electromagnetic design, AC loss

1. 緒言

近年、「エネルギー・資源・環境問題」がクローズアップされるようになり、各産業界でもエネルギー消費削減への取り組みが盛んに行われている。なかでもモータの省エネルギーに大きな期待が寄せられており、より高効率なモータの開発が課題となっている。高効率モータ開発へのアプローチの1つとして、超電導線材を用いた超電導モータが挙げられる。超電導体のもつ“電気抵抗ゼロ・高電流密度”という特長より、銅線では考えられないような高い磁界を非常に小さな損失で発生させることができるためである。当社では、自社開発が進められている超電導線材のアプリケーションとして車載用の超電導モータを考えており、世界で初めてとなる超電導モータにより駆動する超電導電気自動車を試作し、2008年6月の洞爺湖サミット記念環境総合展にて一般公開した⁽¹⁾。

本論文は、超電導線材を用いたモータのメリットがどの程度あるのか検討することを目的とし、磁場解析ソフトウェアを用いた超電導モータの電磁気設計について報告するものである。

2. 超電導モータ車

2-1 超電導線材 超電導体とは臨界温度 (T_c)^{*1}、臨界電流 (I_c)^{*2}、臨界磁場 (H_c)^{*3}以下の条件において「ゼロ抵抗」にて通電が可能となる物質のことである。1911年に4.2K (-269°C)において水銀の超電導状態が発見されて以来、多くの研究者たちによって研究が続けられ、1986年には高温超電導体 (HTS: High Temperature Supercon-

ductor) の発見に至った。“高温超電導体”の定義は、国際電気標準会議 (IEC) の国際規定と日本工業規格によると「一般的に約25K (-248°C)以上の臨界温度 (T_c)を持つ超電導体」とあるが、転移温度が90K (-183°C)を超えるものが一般的になった今では、液体窒素の沸点である77K (-196°C)以上で超電導状態に転移するものを高温超電導体と呼ぶことが多い。高温超電導体の発見によって、それまで超電導体の冷却に用いられてきた液体ヘリウムから安価な液体窒素を用いることで超電導状態を実現することが可能となり、超電導の電力・産業への応用が加速することとなった。当社ではビスマス系 (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x超電導線の性能を独自に開発した加圧焼成法 (CT-OP TM法)⁽²⁾により大幅に向上させ、DI-BSCCO® (Dynamically Inn-ovative BSCCO) の商用化に成功している。

2-2 モータへの超電導線材の適用 一般的に電気モータは、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電力機器であり、磁場と電流の相互作用による力を利用して回転運動を出力する。常電導モータに巻回されるコイルの導線を、超電導線材に置き換えることで得られると考えられるメリットについて図1に示す。

(1) 超電導線材は、「ゼロ抵抗」にて通電することができるため、コイル巻線において発生する銅損がなく、低損失で駆動することが可能となる。特に低速域で、常電導モータは回転軸に同軸の冷却ファンの回転数が低くなり、高負荷時において銅損による発熱にモータの冷却能力が追いつかなくなる。しかし、超電導モータでは、大電流を流しても発熱が生じないため、効率よく低速・大トルクを得

ることができる。

(2) 常電導モータを小型・軽量化するためには、モータの高速回転化が必要であり、変速機を介して減速することで所望のトルクを得る。超電導モータは、前記(1)で述べたように大トルクを効率よく得られるので、ダイレクトドライブ^{*4}による駆動が可能となり、減速機による伝達ロス^{*5}を無視することができる。また、高速回転化が必要でなくなるため鉄損も小さくすることができる。

以上(1)、(2)では、超電導モータについて考えられるメリットについて述べたが、産業応用に際して問題となるのは、超電導コイルを常に超電導状態を維持できる温度、つまり臨界温度以下に維持しなければならないことである。現状の冷却技術を鑑みるに、当面は稼働率の高い用途に用いられるべきと考えられる。また、変速頻度が多く、加減速時に大トルクを必要とする用途にて、特に大きなメリットが得られると考えられる。

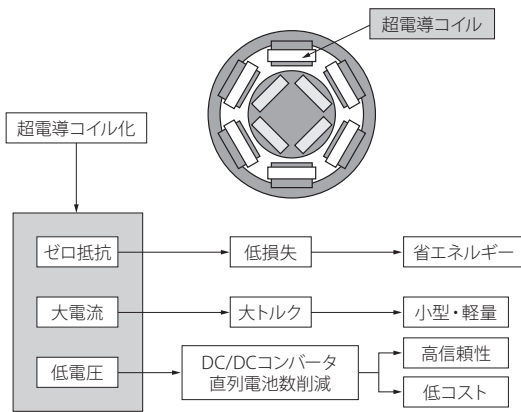


図1 超電導モータのメリット

3. 臨界電流特性とACロス

超電導モータは電気抵抗がゼロであるため、低電圧で大電流を流すことが可能となり、強い磁場を発生させることで大トルクを実現できる。しかし、超電導線材に外部から磁場が印可されると臨界電流値が低下するだけでなく、印可される磁場が臨界磁場以上となると超電導状態が破れ常電導状態へと転移する。Bi系超電導体は、電磁気的特性に異方性を持っており、磁場が超電導体のc軸方向、超電導線材としては厚み方向の磁場に対して臨界電流の低下が大きい。また、図2に示すように、超電導線材の厚み方向に印可される磁場を垂直磁場、幅方向に印可される磁場を平行磁場と定義する。

次に、交流駆動モータの巻線に超電導線材を用いる場合、問題となるのがACロスである。臨界条件下において超電導線材は、損失ゼロとなるが、これは直流電流を通電した

場合においてであり、交流電流通電時は通電による損失が発生する。以下にACロスの発生原理について述べる⁽³⁾。

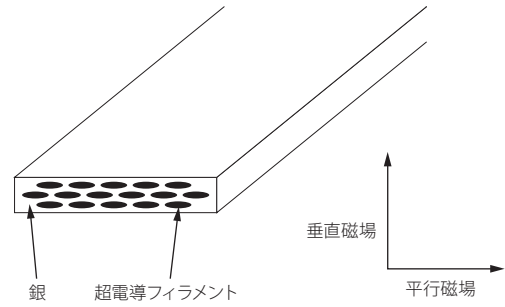


図2 超電導線材の形状と磁場の方向

(1) ヒステリシス損失

図3に示すような厚さ2aの超電導平板に、面方向に平行なピーク値Hmの交流磁界が印可されているとすると、超電導平板内に侵入する磁界分布は図4のようにヒステリシスとなる。このとき、ピン止め力^{*6}に伴う損失が生じ、印可磁場1周期当たりの単位体積当たり損失Qは、

$$Q = 2a\mu_0 J_c H_m$$

μ_0 : 真空中の透磁率、 J_c : 臨界電流密度

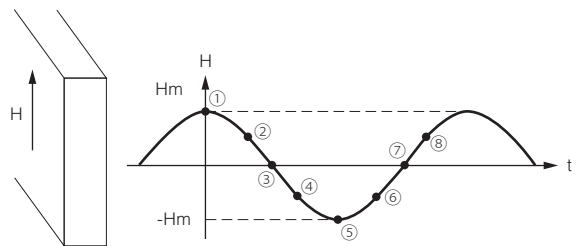


図3 超電導平板モデル

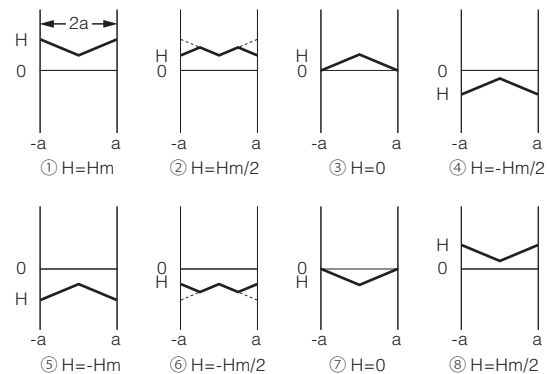


図4 交流磁界が印可されたときの超電導平板内の磁界分布

となり、磁界の変化の仕方によらない磁界のピーク値で決まる損失が発生する。

(2) 結合損失

DI-BSCCO®は図2に示すように被覆導体である銀(白い部分)の中に超電導フィラメント(黒い部分)が埋め込まれた多芯構造となっている。いま、図5に示すような常電導金属を介した超電導体間モデルにおいて、z方向に一樣な変動磁界Hが印可されたとする。このとき、このブロックには磁界の侵入を妨げる方向に結合電流が流れ、常電導部分において発熱が生じる(4)。

(3) 渦電流損失

外部磁場によって、結合電流とは別に常電導金属部分に渦電流が流れ、ジュール損失が生じる。

図6に77K-196°Cにおいて50Hzの交流磁界を印可したときのDI-BSCCO®(Type H:高臨界電流線材、Type S:

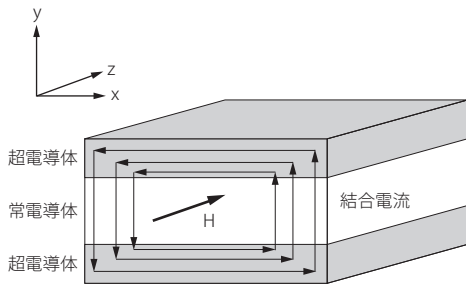
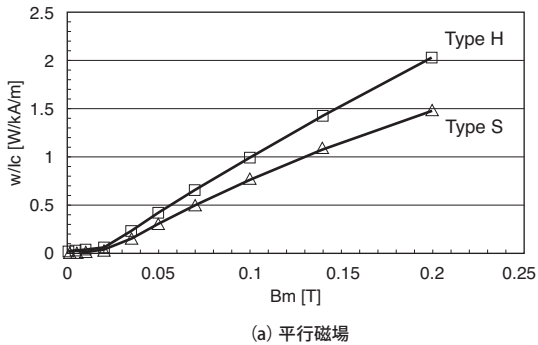
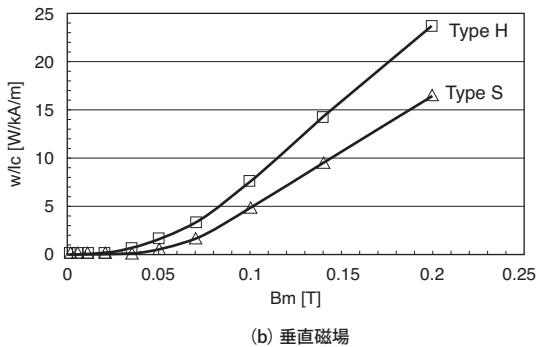


図5 ブロック状複合導体の結合電流モデル



(a) 平行磁場



(b) 垂直磁場

図6 DI-BSCCO®の交流損失@77K、50Hz

スリム線材)の交流損失を示す(5)。

極低磁場(0.01T以下)の領域では、磁場の方向によるACロスに差異は見られないが、磁場が大きくなるにつれて垂直磁場の影響が強くなり、0.1T以上の領域では、平行磁場に対して1オーダー以上の損失が発生する。これについても、Bi系超電導体の電磁気的特性における異方性が起因している。以上、臨界電流特性、ACロスの観点から、低損失な超電導モータを構成するためには、モータ内部における線材の経験磁界の振幅・方向を考慮に入れた設計を行う必要がある。

設計におけるACロスの試算方法は、有限要素法を用いた数値電磁界解析によって行う。まず、ある時刻における超電導線材断面内の電磁界分布をCAEによって求める。次に、各要素について、印可される磁場を垂直磁場と平行磁場とに分け、各磁場方向による損失を図6より求め、全要素について足し合わせることでジュール発熱を計算する。最後に、交流電流および交流磁界の1周期分について計算し、総和を取ることでACロスが求まる。

4. 超電導モータの設計

4-1 モータ仕様 モータ設計は、磁場解析ソフトウェアJMAGを用いたCAEによる電磁気設計にて行った。設計した超電導モータの仕様を表1に示す。

表1 モータ仕様

モーターの種類	IPM
構造	4極6スロット
冷却温度	69K
使用線材	DI-BSCCO® Type S
最高回転数	2,000rpm
最大トルク	3,120Nm

モータの基本構造は、現行のHEV、EVでも一般的であるIPM (Interior Permanent Magnet) モータ*7を採用しており、ステータに巻回されるコイルを超電導化した電機子超電導モータとした。コイル線材はACロス低減のためにDI-BSCCO® Type Sを使用している。Type S(幅2.6mm)は、高臨界電流線材であるType H(幅4.3mm)に比べてスリムサイズとなっており、垂直磁場にさらされる線の幅が小さくなることで図6に示すようにACロスを低減することが可能である。また、コイルの冷却温度を冷凍機を用いて液体窒素の沸点温度以下の69Kとすることで、超電導コイルの臨界電流特性を向上させて使用することを想定している。本モータは、超電導線材の許容両曲げ直径を考慮して、4極6スロットで形成される鉄心構造を有しており、ステータ歯部の周辺に超電導線材を巻回した

レーストラック型コイルを配置している。

4-2 垂直磁場低減設計 既に述べたように、超電導モータを設計する際に重要となるのは、超電導線に印可される垂直磁場の低減である。垂直磁場が大きくなると、モータの効率が悪くなるばかりでなく、コイル線材が超電導状態を維持することができなくなる。本モータについても垂直磁場を低減する設計を行っており、以下にその概要について述べる。

モータを駆動する際、コイルに流れる電流の大きさとコイルのターン数に比例した磁場が発生する。また、モータは回転体であるので、ロータとステータの位置関係によって超電導線に印可される磁場の大きさと向きは常に変化する。よって、垂直磁場を低減する方針として、

- (1) 超電導線に印可される磁場の絶対値を低減する。
- (2) ある大きさと向きをもつ磁場に対して垂直磁場成分を小さくする。

といった設計が考えられる。(1)については、CAEによる磁場解析によって、モータ内に分布する磁場の強弱を知ることができる。スロット内のコイル配置を最適化することで、コイル全体に印可される磁場の絶対値を低減している。(2)については、いま図7(a)に示すような超電導線材の配置でコイルを構成した場合、印可磁場 B_m に対して

$$\text{垂直磁場} : B_m \sin \theta$$

$$\text{平行磁場} : B_m \cos \theta$$

なる大きさの磁場が線材の各方向に印可されるが、図7(b)

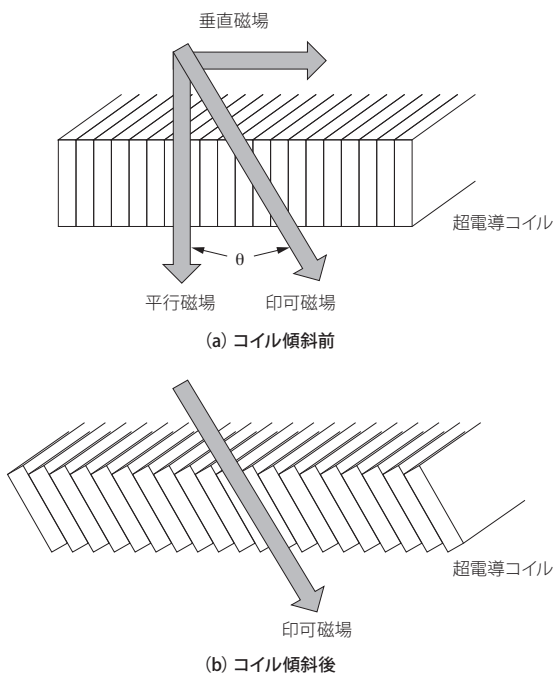


図7 コイルの傾斜による垂直磁場低減

に示すように、磁場の方向に沿うように線材を傾斜させてコイルを構成することで、垂直磁場成分を小さくすることができる。例として、ある大きさの磁場が上式において $\theta = 30^\circ$ の角度で印可されたときのACロスを1とし、線材の傾斜を変化させたときのACロスの変化を図8に示す。磁場の傾斜角は線材の垂直磁場が小さくなる方向を正とする。傾斜角が、磁場の方向に線材が沿う 30° 付近でACロスは最も小さくなり、その大きさは傾斜を設けないときの約15%まで低減することが可能である。実際に超電導線に印可される磁場は、時間に対して向きと大きさが常に変化する。また、あるステータとロータの位置関係からモータが一回転したとき、互いの位置関係は元の状態へと戻るため、磁場の向きと大きさは周期性をもつ。本設計では、この1周期に対して、コイル全体の損失が最小となるように、線材の傾斜を最適化している。

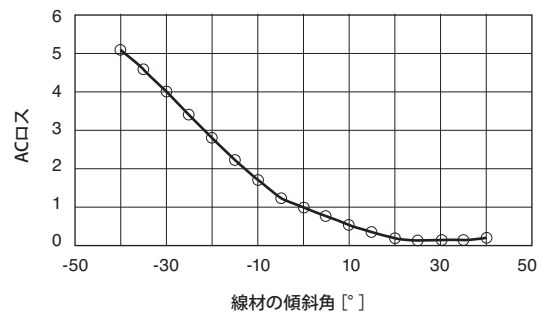


図8 コイルの傾斜角とACロス

4-3 モータ性能 図9に今回設計した電機子超電導モータの断面図を示す。ロータは、マグネットトルク^{*8}とリラクタンストルク^{*9}を有効に利用できるように磁石配置の最適化を行っている。ステータについては、スロット内に超電導コイルを格納し、冷媒を循環させることで冷却を行っている。また、スロットの周りには断熱のための真空層を設けている。

本モータの電流-トルク特性を図10に示す。最大電流(62A)時に3,120Nmのトルクを得ることができる。

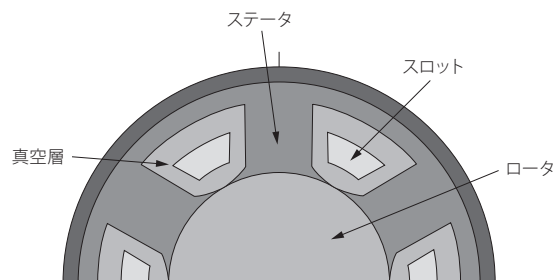


図9 今回設計したモータの断面

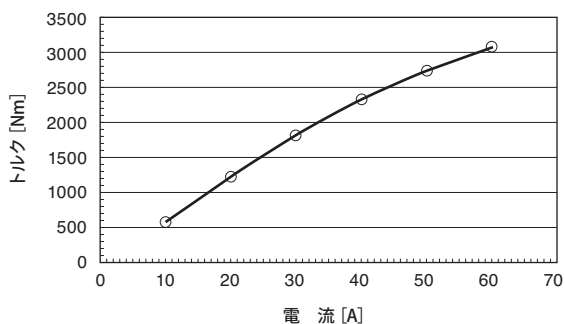


図10 電流-トルク特性

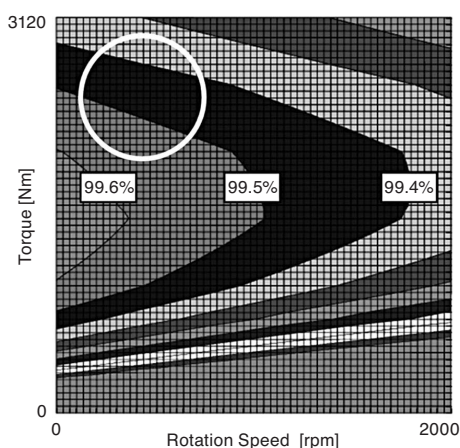


図11 効率マップ

また、図11には、

$$\text{入力 [W]} = \text{出力 [W]} + \text{損失 [W]}$$

$$\text{効率 [\%]} = \frac{\text{出力 [W]}}{\text{入力 [W]}} \times 100$$

上記の式に基づいて、モータ単体としての効率マップを示している。損失については、銅損をゼロ、鉄損、ACロスをCAEによる計算値とし、機械損、浮遊損等は考慮に入っていない。効率マップより本モータは、広い領域に渡って高効率を有していることが分かり、最高効率は99.6%である。また図中の丸枠に示す低速・高トルク領域においても、99.3%以上の高い効率を有している。この領域において常電導モータは、銅損による大きな発熱が生じるが、超電導モータでは高効率を維持しながら駆動することが可能となり、今回の電磁気設計によって効率、運転領域において常電導モータと比較して高性能な超電導モータを設計することができた。

5. 結 言

自社開発のBi系超電導線材DI-BSCCO®を用いた電機子超電導モータの電磁気設計を、CAEによる電磁気解析によって行った。今回設計したモータは、電機子巻線を超電導化した電機子超電導モータであり、超電導線に交流電流を通電したときに生じるACロスを低減するために、超電導線に印可される垂直磁場の低減に取り組んでいる。本モータは、超電導線のもつ特長により、広範囲に渡って高効率で駆動することができ、低速・高トルク領域においても低損失であることから、自動車ではバス、宅配搬送車(宅配便)、また、建機、フォークリフトといった幅広い用途に用いられることが期待できる。今後は、実機の試作による評価を行い、本設計通りの性能が得られるかを検証する予定である。

用語集

※1 臨界温度 T_c

常電導から超電導、あるいは超電導から常電導に相転移する温度。

※2 臨界電流 I_c

超電導体に流せる限界の電流値であり、これ以上の電流を通電した場合、常電導に転移してジュール損失が発生する。

※3 臨界磁場 H_c

超電導状態を破壊してしまう磁場の値のこと。磁場による反応の違いから超電導体には第一種超電導体と第二種超電導体の二種類があり、第二種超電導体は H_{c1} と H_{c2} の2つの臨界磁場を持つ。DI-BSCCO®は第二種超電導体である。

※4 ダイレクトドライブ

電動機(モータ)の回転力を間接的機構(ギアボックス等)を介さずに直接、駆動対象に伝達する方式、または機構。

※5 伝達ロス

ギアによる動力の伝達において、歯車摩擦損失(かみ合い)、およびかさまわし損失(潤滑油攪拌)による摩擦熱。

※6 ピン止め力

第二種超電導体において、外部磁場が臨界磁場 H_{c1} と H_{c2} の間にあるとき、磁束が超電導体の内部にあるひずみや不純物等の常電導部分に捕らえられ、ピンで止めたように動かなくなる現象を「ピン止め現象」。このときの補足力。

※7 IPMモータ

ロータの内部に磁石を埋め込んだ構造を持つ回転界磁形式の同期モータ。

※8 マグネットトルク

ステータの極とロータの永久磁石の磁極との吸引及び反発によって発生するトルク。

※9 リラクタンストルク

ステータの回転磁界による極とロータの突極との吸引力だけによって生ずるトルク。磁路の磁気抵抗（リラクタンス）が小さくなる方向に働き、ロータの極のS、Nによらない。

参 考 文 献

- (1) 尾山仁、新里剛、林和彦、北島健二、有吉剛、澤井孝典、「超電導電気自動車の開発」、SEIテクニカルレビュー、第173号、p.59-p.63 (2008)
- (2) 加藤武志、藤上純、小林慎一、山崎浩平、綾井直樹、藤野剛三、上野栄作、菊地昌志、山出哲、林和彦、佐藤謙一、「革新的ビスマス系高温超電導線（DI-BSCCO®の開発）」、SEIテクニカルレビュー、第168号、p.19-p.23 (2006)
- (3) N. Amemiya, "Electromagnetic Phenomena in Superconductors"
- (4) 山村昌、菅原昌敬、塚本修巳、山口貢、山本充義、「超電導工学」、電気学会大学講座
- (5) N. Ayai, S. Kobayashi, M. Kikuchi, T. Ishida, J. Fujikami, K. Yamazaki, S. Yamade, K. Tatamidani, K. Hayashi, K. Sato, H. Kitaguchi, H. Kumakura, K. Osamura, J. Shimoyama, H. Kamijyo, Y. Fukumoto, "Progress in performance of DI-BSCCO® family", Physica C 468 (2008) 1747-1752

執 筆 者

馬場 猛* : 自動車技術研究所
超電導自動車に搭載される超電導モータ
の開発・設計に従事



尾山 仁 : 電力・エネルギー研究所 グループ長

有吉 剛 : 自動車技術研究所 グループ長

澤井 孝典 : 自動車技術研究所 所長

*主執筆者