

テーマ解説

高温超電導誘導同期回転機の開発現状

中村 武恒*

Current Status of HTS Induction/Synchronous Machine Development

Taketsune NAKAMURA*

Synopsis: This paper reviews the current status of high-temperature superconducting induction/synchronous machine developments. The novel performance of the machine is explained through analysis and experiments. Furthermore, realizable uses of the machine in both large-capacity and intermediate-sized applications are discussed for industrial innovation. The development status of some applications in such machines as electric vehicles, electrified railway systems, generators and liquid-hydrogen circulation systems, is summarized and discussed.

Keywords: HTS induction/synchronous machine, electric vehicle, electrified railway, generator, liquid-hydrogen circulation pump

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

近年、酸化物系高温超電導線材の開発進展は目覚ましく、様々な応用をターゲットとした精力的な研究開発が行われている。ビスマス系高温超電導テープ材については、数 km に亘る特性の安定した市販材を入手可能であり、工業線材としての地位を確立しつつあると考えられる。また、イットリウム系テープ材についても市販が開始されており、今後さらなる性能面ならびにコスト面の進展が期待される。さらに、その他の線材として MgB_2 線材も適材適所で使われていくものと思われる。

回転機は、超電導技術の重要な応用機器の一つである。低温超電導回転機については、70 MW 級発電機の開発が実施され、大きな成功を収めた¹⁾。ただし、当時の経済状況等がブレーキとなり、その後実用化指向の研究開発は進展しなかった。一方、高温超電導回転機については、上記低温超電導機に比較して高温運転に伴う冷却コスト低減や熱的安定性の改善を背景として、発電機だけでなく比較的中小容量機の多いモータについても、輸送機器を中心に積極的な技術開発が実施されている（なぜか、タービン発電機を高温超電導化する検討はあまり聞かない）。このことは、我が国の総電力消費量に占めるモータ駆動分の割合が

50%を超える現状を鑑みると、発電機だけでなくモータの高温超電導化の成否が同技術によるイノベーション創出の鍵を握っていると考えられる。

一般に、超電導回転機は冷却を要することから、大型機のスケールメリットを利用して冷却ペナルティの影響を低減するコンセプトの研究開発が主流と考えられる。しかしながら、上記イノベーションを達成するためには、如何に中小容量の回転機まで超電導化の優位性を示せるかが、困難ではあるが極めて重要な技術開発課題である。なお、冷却に関して一点超電導側から主張しておきたい。即ち、従来機では、大きな損失は最終的に機器の大きな発熱を導き、それを取り除くために冷却系を必要とする。一方、超電導機本体の損失・発熱は圧倒的に低く、その低損失機を実現するために合目的的に冷凍機を使用していることから、システムが成立するならば極めて合理的回転機と言える。

本稿では、筆者らが研究開発している高温超電導誘導同期回転機（High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: 以下 HTS-ISM）について、その駆動原理および特長を説明する。さらに、現在推進中若しくは過去に検討した応用例を紹介し、今後の可能性を展望する。

2. 基本的考え方と特長

2.1 基本的考え方

高温超電導誘導同期機の基本構造は、既存のかご形誘導機と同様である。かご形誘導機は、既存機として最も汎用されており、その簡易な構造、保守の容易性、安価他の利

Received March 2, 2012

* 京都大学大学院工学研究科
〒615-8510 京都市西京区京都大学桂一丁目
Graduate School of Engineering, Kyoto University, 1
Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

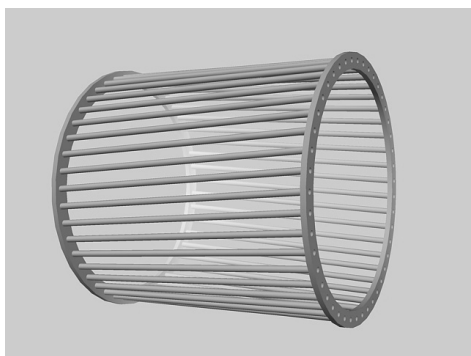


Fig. 1 Schematic diagram of the squirrel-cage secondary winding.

点から“産業のコメ”と呼ばれるほど広く使われている。なお、その他の回転機として直流機と同期機がある。直流機は、その回転制御が容易であるが、整流子・ブラシを伴うことから保守性が悪く、誘導機への置き換えが進んでいる。同期機としては、巻線形機が専ら発電用として用いられていたが、近年の永久磁石界磁の実用化に伴ってモータとしても使われるようになってきている。

一方、誘導機は駆動原理上所謂“すべり” s ($= (N_s - N)/N_s$; N_s : 同期回転数(ギャップ回転磁束の回転数), N : 回転子の回転数)を伴うことから、効率や力率が低いと考えられており、その超電導化についても近年まで顧みられることは無かった。しかしながら、筆者らはまず車載用埋込み磁石形永久磁石電動機とかご形誘導機について同一体格における限界性能比較を行い、ギャップ磁束密度やその空間高調波成分を可能な限り均等化した場合に同等のトルク密度が得られることを解析結果に基づいて明らかにした²⁾。そして、上記誘導機への超電導適用によるさらなる高性能化達成という論理に基づいて研究を展開している。即ち、超電導線材の第一義的メリットである超低損失大電流輸送特性・非線形抵抗特性を利用するという観点から回転機を見直した場合、磁気回路を形成するために鉄心を必要とするものの、かご形誘導機は大きな可能性を有していると期待される³⁻⁹⁾。**Fig. 1**には、かご形誘導機における二次側かご形巻線の概略図を示す。

2.2 特長

かご形巻線を HTS 化した HTS-ISM について、その特長は下記のようにまとめられる。

(1) 同期トルクと非同期トルクの両立性

従来形誘導機は非同期(すべり)トルクしかもたず、一方で従来形同期機は同期トルクしかもたない。しかしながら、HTS-ISM は本質的特長として両者のトルクを有しており、回転機としての性能に大きな広がりがある。上記トルク特性は、既存の常電導回転機において機械的切り替え式以外では実現不可能であり、材料特性を巧み

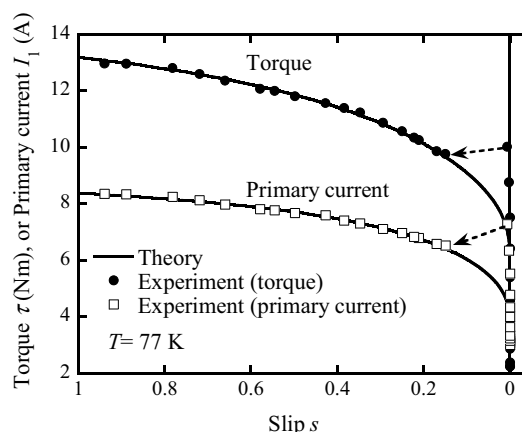


Fig. 2 Example of the load-test result at 77 K⁷⁾. Quantity s is defined as $(N_s - N)/N_s$ (N_s : rotating speed of air-gap magnetic field; N : rotor's actual speed)⁷⁾.

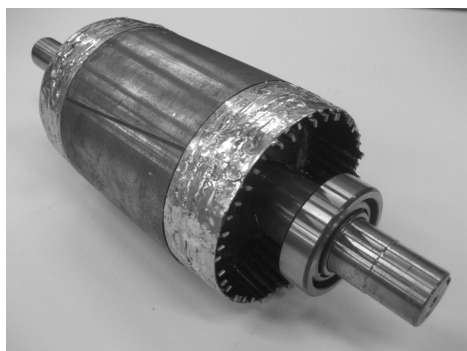
に利用していると言える。**Fig. 2**には、筆者の研究室で試作した小型 HTS-ISM について、液体窒素浸漬状態における負荷試験結果の一例を示す⁷⁾。同図から明らかにように、試作機は同期トルクと非同期トルクの両者を有しており、さらに(詳細は割愛するが)非線形等価回路解析結果と良く一致している(同期はずれ付近の不連続遷移領域は、複雑な検討を要することから考慮していない)。なお、上記特性と材料特性との詳細な関係についても、Y 系線材¹⁰⁾ならびに DI-BSCCO 線材¹¹⁾についてそれぞれ共同研究を通して明確化した。

(2) 同期運転に伴う高効率化

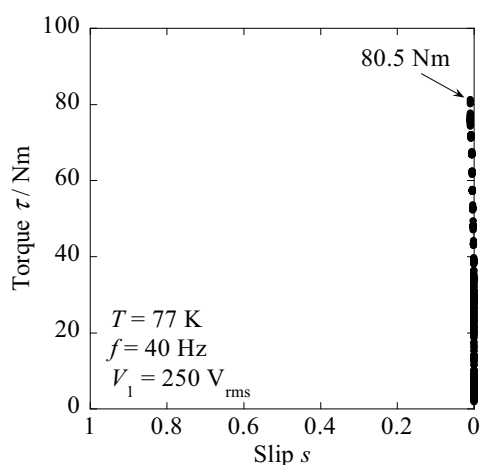
HTS-ISM の基本的運転モードとしては、同期回転を考える。従って、誘導機の構造的利点を兼ね備えかつ高効率な回転機が実現される。実際の HTS-ISM では、僅かなすべりを有する“準同期回転”³⁾で運転することになるが、そのような微小すべりを制御することは現実的で無く、通常は同期機としてベクトル制御運転する。

(3) 過負荷に対するロバスト性ならびに過負荷耐量の概念の成立性

HTS-ISM に最大同期トルクを超える要求負荷(過負荷)が印加された場合、すべり回転に移行して暫時運転状態を継続可能である。特に、高アスペクト比という HTS 線材の構造的長をうまく利用することによって漏れリアクタンスを低減でき、(うまく設計すれば)いわゆる垂下加速特性を実現可能であることから、非常に広いすべり領域にて回転可能である。こうした特長を利用すれば、(一つの設計思想として)HTS-ISM をあくまで同期機として制御し、過負荷時は回転機側のインテリジェントな自己制御性に任せるコンセプトのロバスト性実現が期待される(ただし、すべり回転時は二次 Joule 損 $s/(1-s)P_o$ (P_o : 機械出力)が発生することから、この状態での運転はできるだけ短時間にする必要がある)。



(a) Photograph of the fabricated HTS-ISM rotor.



(b) Typical load-test result.

Fig. 3 Evidence for the high torque density of HTS-ISM^{9,12)}.

また、上記議論をさらに進めると、従来機で成立する過負荷耐量や時間定格の概念も設計に取り入れることが可能になると期待される。即ち、超電導回転機では、使用される超電導線材の臨界電流値を超える運転は一般に不可能であり、その値を限界値として経験的なマージン（負荷率）を導入して設計される。このことは、低温超電導機を中心としてシステム冷却系の安全性確保の観点から重要な考え方である。しかしながら、HTS 回転機では高い運転温度を設定可能であり、それに伴う比熱上昇も幸いして所謂クエンチが起きにくい。また、上記したすべり状態も積極的に利用すれば、損失状態を含めて超電導回転機の定格を設定できると期待される。

(4) 高トルク密度化・高出力密度化

HTS 回転子におけるロータバーの電流容量を大きくし、かつそれに応じて起磁力条件を最適化することにより、比較的容易に高トルク密度化ならびに高出力密度化を実現することができる。**Fig. 3 (a)**には、筆者の研究室で試作した高トルク密度型 HTS 回転子の外観写真を示す^{9,12)}。

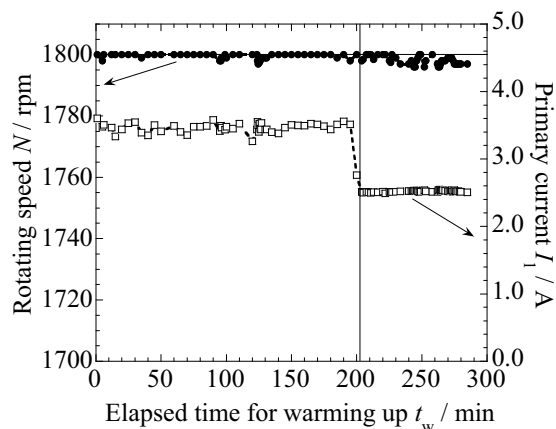


Fig. 4 No-load rotation test result for superconductor/normal conductor hybrid cage windings⁸⁾. Initial temperature is 77 K.

また、**Fig. 3 (b)**には入力条件（電圧、周波数）＝（250 V_{rms}, 40 Hz）における負荷試験結果（液体窒素浸漬冷却）の一例を示す⁹⁾。同図から、試作機は準同期回転にもかかわらず 80 Nm を超える高トルクを実現しており、このときの出力は約 10 kW である。

なお、本回転機は市販の三定格誘導機（定格出力: 1.5 kW@ (200 V, 60 Hz), 定格トルク 8 Nm, 停動トルク 22 Nm 程度）を研究室で改造したものであり、かなりの高トルク密度化を実現できている。

(5) 非超電導状態からの連続駆動の可能性

HTS かご形回転子は、誘導現象（まず二次巻線に速度起電力が発生し、その空間分布に対応する抵抗値によって電流が誘導される）を利用してトルクが発生するため、強制通電時のような焼損のリスクを回避することができる。そこで、HTS かご形巻線に積極的に常電導巻線を付与したハイブリッド二重巻線構造とすることにより、非超電導状態においても連続駆動が期待され、“常に冷却しておかなければならない”という超電導機運転の際の制約を緩和することができる。**Fig. 4** には、ハイブリッド巻線を適用した HTS-ISM における無負荷回転特性の試験結果を示す⁸⁾。まず、液体窒素中（77 K）で同期引き入れを行い、その後液体窒素をクライオスタット外に排出して昇温する際の無負荷回転特性の推移を測定した。同図から明らかなように、はじめ HTS-ISM は同期回転数（1800 rpm）で回転しているが、 $t_w = 190$ min 付近から揺らぎが生じ、203 min 以降では完全なすべり回転に移行している。また、それに伴って一次電流も明確に低下しているが安全に回転状態を維持することができた。現在は、特に超電導転移温度近傍における負荷時連続駆動法の確立を目指して検討を実施している^{13,14)}。

(6) 自律安定制御性

本制御性の概念は、NEDO 委託事業（後述）の中で実証した¹⁵⁻¹⁸⁾。従来の常電導誘導機では、巨視的に Ohm の法則に従う巻線抵抗が単純に小さくなった場合、急激な可変速に対して力学系が不安定になり、そのままでは制御不能になることが知られている（このことは、筆者自身も HTS-ISM の研究開始時より小容量機で経験しており、常識として理解していた）。一方 HTS-ISM では、力学系が不安定になろうとすると磁束フロー状態に起因する大きな起磁力依存非線形抵抗が発現し、安定回転が可能となる。このことは、はじめに解析的に明確化し、その後実機によって実証した。興味深い注目点としては、可変速時に瞬間的に大きな抵抗が発現するが、回転安定が確立するとアボトシスの如くその抵抗が消失することである。このことは、HTS 線材の特性が回転機の高機能化に寄与するだけでなく、その制御性にも大きな威力を発揮する極めて重要な特長である。

以上の特長は、基本的に HTS かご形巻線を適用した場合についてまとめたものであり、回転磁界を発生する一次巻線については特に触れていない。一方、一次巻線も超電導化する全超電導 HTS-ISM についてもチャレンジングな検討が行われており、以下に数例を紹介する。なお、一次巻線の超電導化については、HTS 巻線の機械歪に対する耐性や臨界電流密度、交流損失他を制約条件とした巻線構成に関する検討が主として実施されており、難しい技術開発課題である。さらに、超電導一次巻線については、交流可変抵抗となるが故に三相不平衡となりやすく、このことも慎重に検討しなければならない¹⁹⁾。

3. 電気自動車

自動車は、我々のモビリティを支える最も汎用性の高い輸送機器の一つであり、その電気駆動化が省エネルギーやパフォーマンス改善の観点から精力的に進められている。従って、超電導技術によってイノベーションを実現するためには、自動車（特に自家用車）についてその実現可能性を示す必要があり、冷却の観点から大きな困難を伴うものの挑戦する必要がある重要な技術分野である。自動車の超電導化については、はじめに（株）イムラ材料開発研究所・名古屋大学の研究チームが、高温超電導バルクモータを搭載したゴルフカートの走行試験に成功した²⁰⁾。その後、住友電気工業（株）がビスマス系ダブルパンケーキコイルを使用したクローボール形直流直巻モータを開発し、乗用車に搭載した走行試験に成功している²¹⁾。

京都大学・（株）イムラ材料開発研究所・アイシン精機（株）を中心とする産学グループは、2008 年より電気自動車搭載を目指した HTS-ISM の研究開発を実施し、2009 年 10 月～2011 年 2 月には NEDO の援助（平成 21 年度省エネ

ルギー革新技術開発事業（第二次公募）も受けて、開発を加速させた。その結果、実質 1 年 3 ヶ月程度の開発期間ではあったが、以下の成果を上げることができた。

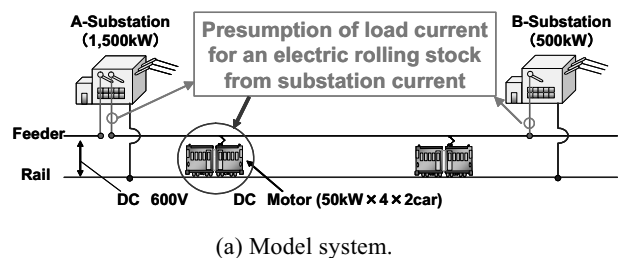
- ① 20 kW 級 HTS 回転機の開発（HTS 固定子巻線技術開発（許容曲げ特性と幾何学的制約条件・鉄心中における臨界電流の漏れ磁界依存性と鏡像効果を考慮した巻線構成の最適化）、鉄心の極低温下における機械特性ならびに電磁特性の定量化、銅線ならびに HTS 線を適用した実機試作、銅固定子を適用した負荷試験成功と理論解析結果との一致、銅固定子を適用した無負荷時ならびに負荷時加速性能の実証、HTS 固定子巻線を適用した 1200 rpm における無負荷回転試験成功）²²⁻²⁵⁾、
- ② 回転機制御コードの開発（電圧方程式+力学方程式に基づく制御コード開発の成功、HTS 線材の起磁力依存非線形抵抗を利用した自律安定制御性の理論予測と実験的検証成功）^{15-18, 26)}、
- ③ スターリング型冷凍機の開発（COP 0.075@77 K 達成および 0.1 の達成に目途）、
- ④ 車載用小型冷却構造の開発（回転機静止時熱侵入 150 W 未満達成、低熱侵入回転シャフトの開発）。

以上のように、大成功と主張できる特筆すべき成果を上げることができた²⁷⁻²⁸⁾。現在は、上記成果を受けて実用化のために解決すべき課題を明確化し、さらなる研究開発を実施している。Fig. 5 には、開発した 20 kW 級 HTS-ISM の外観写真を示す（厳密に説明すると、HTS 回転子は 50 kW 級の出力特性を有しているが、現 HTS 固定子巻線への通電可能電流値から、出力 20 kW に制約されている；上部には、液体窒素溜め容器が設置してあるが、将来的には小型冷凍機用圧縮機が設置される）。

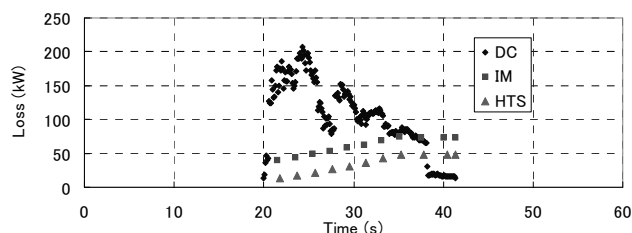
また筆者は、別途 HTS-ISM の回転子鉄心中に HTS 磁気遮蔽体を挿入してリラクタンストルクを付与する検討も実施している²⁹⁾。



Fig. 5 Photograph of the 20 kW-class HTS-ISM designed for automobile applications²⁵⁾.



(a) Model system.



(b) Analysis example of the energy losses for a certain operation mode of an electrified train (DC: Direct current motor; IM: Induction motor; HTS: HTS induction /synchronous motor). The train is driven from 20 s.

Fig. 6 Simulations of energy conversion efficiency for an electrified railway system³⁰⁾.

4. 電気鉄道

筆者らは、HTS-ISM を電気鉄道に適用する検討も実施している³⁰⁻³²⁾。本検討は、上記鉄道システムにおける電力供給システムの省エネ化・高度化を図る観点から、供給側に電気二重層キャパシタを導入して回生電力の有効利用を図ると共に、需要側である駆動モータについて、既存機との比較を通して HTS-ISM の有効性を検証したものである（電気二重層キャパシタの導入効果については、主として（公財）鉄道総合技術研究所で実施されている）。**Fig. 6 (a)**には、ある線区についてモデル化した電気鉄道システムの概略図を示す³⁰⁾。同線区について、変電所からみた電力負荷特性のデータをもとに、電車に搭載されている直流直巻モータのトルク特性を同定した。また、同等の出力特性を有するか形誘導機（IM）および HTS-ISM について、その負荷特性を比較検討した。**Fig. 6 (b)**には、ある運転モード（時刻 20 s に始動）における電力損失の解析結果を示すが、HTS-ISM は、IM に比較しても数十 kW 程度の低損失化が期待できる（冷凍機の COP については、将来的な性能向上を期待して 0.15@77 K と仮定した）。なお、直流機の解析結果では、始動時に大きな損失が発生しているが、これは力行時電機子抵抗が大きいためである（紙面の都合により、詳細は文献³⁰⁾を参照されたい）。

さらに、市販の回路シミュレータ上で HTS-ISM の等価インピーダンスモデルを構築し、直流線区上を走行するシ

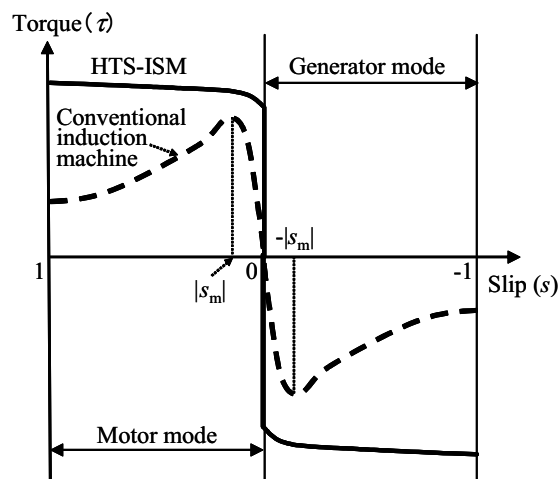


Fig. 7 Schematic diagram of the torque (τ) versus slip (s) curves in a conventional (normal conducting) induction motor and HTS-ISM³³⁾.

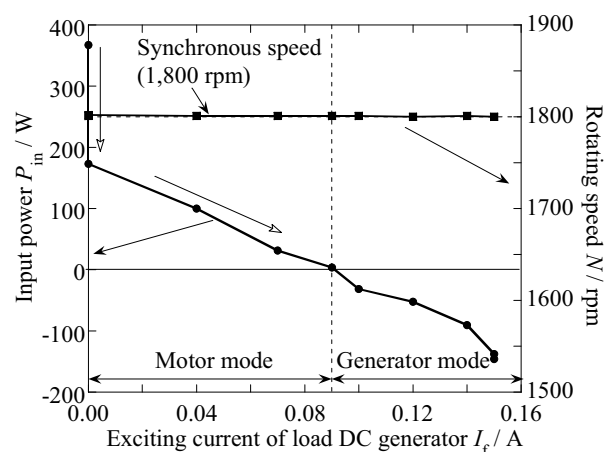
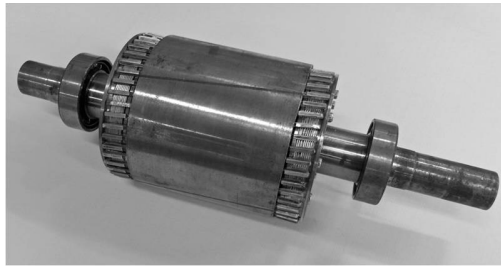


Fig. 8 Experimental results of the power generation characteristics at 77 K³³⁾.

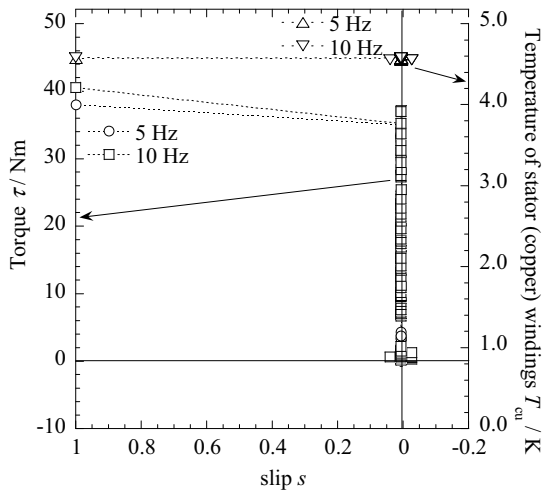
ミュレーションを実施したところ、力行ならびに回生特性の改善に伴って高効率なシステムが実現される可能性を示すことができた（なお、最近では永久磁石駆動モータも一部線区で使用されているが、未だ限定的な導入であることから、本研究では検討していない³²⁾。今後は、シミュレーション結果を実験的に検証する必要がある、種々検討を進めている。

5. 発電機応用

京都大学と中部電力（株）は、HTS-ISM を発電機に適用するための基礎検討を行った³³⁾。まず、**Fig. 7**には HTS-ISM におけるトルク (τ) —すべり (s) 特性の概略図を示す。回転機を発電動作させるためには、負のトルク（つまり機械入力）を与える必要がある。図において、従来の誘導機では、機械入力を与えるために同期速度を超える負の



(a) Photograph of the MgB₂ rotor.



(b) Load test results for operation at 4 K.

Fig. 9 Fabrication and load testing of the MgB₂ motor for a liquid-hydrogen circulation pump³⁸⁾.

すべり領域で運転する必要がある。その際、一次側は常に励磁しておく必要がある。一方、HTS-ISM では機械入力を与えても大きな同期化力で同期速度 ($s=0$) を維持し、つまり同期発電が可能である。その際、現状は二次巻線に存在する微小なハンダ接続抵抗他の補償分だけ起磁力を与える必要があるが、最終的に超電導接続が可能になれば、永久磁石発電機と同様な発電運転が可能になると期待される。

Fig. 8 には、液体窒素浸漬条件下における HTS-ISM の発電特性の測定例を示す³³⁾。本試験では、まず HTS-ISM を無負荷で励磁し、同期回転 (1800 rpm) 状態に引き入れる。その後、HTS-ISM の出力シャフトに接続した直流機を界磁制御して負荷印加し、パワーの流れを観測した。同図から明らかなように、界磁電流が 90 mA 付近を超えると HTS-ISM の電氣入力が負となっており、即ち同期発電が実現されている。本結果に基づく基礎検討の結果、少なくとも 5 MW 級程度までの発電システムについて、高効率な回転機を実現可能との結果を得ることができている。

なお、上記応用の可能性として風力発電が考えられる。例えば、永久磁石風力発電機に関しては、(株)日立製作所を中心とするグループが 5 MW 級機的设计検討を実施して

おり、ギアレスを想定した超低速機について 169 トン (システム効率: 93%)、1 段ギアの場合に 30 トン (同 92%) との報告がある³⁴⁾。HTS-ISM が、上記常電導発電機や、あるいはその他の風力発電用 HTS 回転機³⁵⁻³⁷⁾に比較して特性上のメリットを見出せるか若しくは棲み分けができるかについては、今後さらに検討していく必要がある。

6. 液体水素移送ポンプ

九州大学・京都大学・(株)日立製作所 日立研究所は、九州大学が受けた NEDO の助成 (産業技術研究助成事業費助成金 (若手グラント)、2008~2012 年) をベースとして、MgB₂ 線材を適用した液体水素移送システムの研究開発を行った。本プロジェクトでは、日立研究所が MgB₂ 線材の作製を行い、その線材を適用して京都大学が誘導同期モータの開発・試験を担当した^{38,39)}。また、九州大学は MgB₂ 液面計の開発を実施し、最終的に上記モータと組み合わせることによって送液システムを完成させ、液体ヘリウム⁴⁰⁾ならびに液体水素の送液試験に成功した⁴¹⁾。なお、九州大学では、MgB₂ 線材を一次巻線に適用した際の交流損失の精密な解析も実施している⁴²⁻⁴⁴⁾。

Fig. 9 (a)には開発した MgB₂ 回転子の外観写真を、また **Fig. 9** (b)には液体ヘリウム (4 K) における負荷試験結果の一例をそれぞれ示す (固定子は、市販の 3 相 4 極銅巻線である)³⁸⁾。図(b)から明らかなように、開発機は 38 Nm 程度の最大同期トルクを有するとともに、MgB₂ 線材の極めて高い n 値 (電界-電流密度特性の立ち上がりの急峻さ) を反映してほぼ定トルクの加速特性を有している。

7. まとめ

以上、本稿では HTS-ISM の基本的考え方と特長について概説し、過去に実施したあるいは現在進行中の応用例を紹介した。HTS-ISM は、HTS 線材の第一義的特長である超低損失大電流通電特性を利用する電氣装荷最大化型回転機と考えることができる。換言すると、HTS 線材の真価を如何なく発揮する絶好の回転機である。

これまでの関係各位のご尽力に感謝するとともに、真の実用化を目指して今後共々協力をお願い申し上げる次第である。

参考文献

- 1) S.S. Kalsi, K. Weeber, H. Takesue, C. Lewis, H.-W. Neumueller and R.D. Blaugher: "Development status of rotating machines employing superconducting field windings", *Proc. IEEE* **92** (2004) 1688-1704
- 2) D. Sekiguchi, T. Nishimura, K. Matsumura, R. Asai, T. Nakamura, N. Amemiya and T. Yasuda: "An analytical study on heat generation characteristics of squirrel-cage IM and PM motor from the view point of air-gap magnetic flux distribution", *The 2010 annual meeting record I.E.E. Japan* **5** (2010) 42 (in Japanese)

- 関口大輔, 西村敏治, 松村一弘, 浅井力矢, 中村武恒, 雨宮尚之, 保田富夫:「ギャップ磁束に着目したかご型誘導機と永久磁石同期機の発熱特性の一解析的検討」, 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集 **5** (2010) 42
- 3) G. Morita, T. Nakamura and I. Muta: “Theoretical analysis of a YBCO squirrel-cage type induction motor based on an equivalent circuit”, *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 473-478
 - 4) T. Nakamura, H. Miyake, Y. Ogama, G. Morita, I. Muta and T. Hoshino: “Fabrication and characteristics of HTS induction motor by the use of Bi-2223/Ag squirrel-cage rotor”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 1469-1472
 - 5) T. Nakamura, Y. Ogama and H. Miyake: “Performance of inverter fed HTS induction-synchronous motor operated in liquid nitrogen”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 1615-1618
 - 6) T. Nakamura, Y. Ogama, H. Miyake, K. Nagao and T. Nishimura: “Novel rotating characteristics of a squirrel-cage-type HTS induction/synchronous motor”, *Supercond. Sci. Technol.* **20** (2007) 911-918
 - 7) T. Nakamura, T. Nishimura, K. Nagao, K. Matsumura and Y. Ogama: “Theoretical analysis of high temperature superconducting induction/synchronous machine based on the nonlinear electrical equivalent circuit”, *Proc. XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM'08)*, September 6-9, 2008, Vilamoura, Portugal (2008) ID. 1278 (5pp)
 - 8) T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura and K. Matsumura: “Induction/synchronous motor having HTS/normal conductor hybrid double-cage rotor windings”, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 045022(7pp)
 - 9) T. Nakamura, K. Matsumura, T. Nishimura, K. Nagao, Y. Yamada, N. Amemiya, Y. Itoh, T. Terazawa and K. Osamura: “A high temperature superconducting induction/synchronous motor with a ten-fold improvement in torque density”, *Supercond. Sci. Technol.* **24** (2011) 015014 (6pp)
 - 10) K. Nagao, T. Nakamura, T. Nishimura, Y. Ogama, N. Kashima, S. Nagaya, K. Suzuki, T. Izumi and Y. Shiohara: “Development and fundamental characteristics of YBCO superconducting induction-synchronous motor operated in liquid nitrogen”, *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 015022(5pp)
 - 11) T. Nakamura, K. Nagao, T. Nishimura, Y. Ogama, M. Kawamoto, T. Okazaki, N. Ayai and H. Oyama: “Direct relationship between output power and current carrying capability of rotor bars in HTS induction/synchronous motor with the use of DI-BSCCO tapes”, *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 085006 (5pp)
 - 12) 日本経済新聞「超電導モーター 電気自動車向け開発加速」(2009 年 11 月 30 日付, 12 面)
 - 13) T. Nakamura, H. Shimura, D. Sekiguchi, H. Kitano, S. Misawa, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa and M. Sugano: “Novel operational concept of HTS induction/synchronous machine: from non-superconducting to superconducting state”, *ICEC24-ICMC2012*, Fukuoka (2012) 16A-OR2-01
 - 14) H. Shimura, T. Nakamura, H. Kitano, T. Nishimura, N. Amemiya and Y. Itoh: “Challenging operational breakthrough for HTS induction/synchronous machine below and above its critical temperature”, *ASC2012*, Portland, Oregon, USA (2012) abstract submitted
 - 15) H. Kitano, T. Nakamura, D. Sekiguchi, S. Misawa, Y. Kawanishi and N. Amemiya: “Study on rotation stability of HTS induction-synchronous machine”, *Annual Conference IEE Japan* **5** (2011) 5-115 (in Japanese)
 - 北野紘生, 中村武恒, 関口大輔, 三澤慎太郎, 川西勇作, 雨宮尚之:「高温超電導誘導同期機の安定性に関する検討」, 平成 23 年電気学会全国大会 **5** (2011) 5-115
 - 16) H. Kitano, T. Nakamura, D. Sekiguchi, N. Amemiya and Y. Itoh: “Study on autonomous stability of HTS induction-synchronous machine”, *2011 Annual Conference of I.E.E. of Japan, Industrial Applications Society* (2011) 3-81 (in Japanese)
 - 北野紘生, 中村武恒, 関口大輔, 雨宮尚之, 伊藤佳孝:「高温超電導誘導同期機の自律安定性に関する検討」, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, 琉球大学千原キャンパス, 中頭郡 (2011) 3-81
 - 17) T. Nakamura: “Rotating characteristics of induction/synchronous motor by use of nonlinear property of HTS wires”, *The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors*, Sumitomo Club, Osaka (2011) 1A-15
 - 18) T. Nakamura, H. Kitano, D. Sekiguchi, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, Y. Ohashi and N. Okumura: “Novel concept of autonomous stability in HTS induction/synchronous motor”, unpublished
 - 19) T. Nakamura, D. Sekiguchi, S. Misawa, H. Kitano, H. Shimura, T. Nishimura, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, Y. Ohashi and N. Okumura: “Development of next generation drive system by use of HTS induction/synchronous machine”, *3rd International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012)*, Istanbul, Turkey (2012) S-I-1292
 - 20) 超電導コミュニケーションズ, vol. 4, no.1 (1996)
 - 21) 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* **173** (2008) 59-63
 - 22) T. Futakuchi, T. Maekawa, J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sato, T. Nakamura and K. Osamura: “AC loss characteristics of HTS tape in iron”, *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 123 (in Japanese)
 - 二口達壮, 前川達也, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤孝雄, 中村武恒, 長村光造:「鉄心中における高温超伝導線材の交流損失特性」, 第 83 回秋季低温工学・超電導学会講演概要集 **83** (2010) 123
 - 23) K. Osamura, T. Nakamura, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa and R. Yabuno: “In-situ bending dependence of critical current of BSCCO tapes”, *Abstracts of CSJ Conference* **83** (2010) 147 (in Japanese)
 - 長村光造, 中村武恒, 伊藤佳孝, 吉川雅章, 寺澤俊久, 藪野良平:「DI-BSCCO テープにおける低温曲げ歪の臨界電流への影響」, 第 83 回秋季低温工学・超電導学会講演概要集 **83** (2010) 147
 - 24) M. Miyamoto, T. Matsuo and T. Nakamura: “Measurement of vector hysteretic property of silicon steel sheets at liquid nitrogen temperature”, *Przeglad Elektrotechniczny* **87-9b** (2011) 111-114
 - 25) D. Sekiguchi, T. Nakamura, S. Misawa, Y. Kawanishi, H. Kitano, M. Fukui, T. Matsuo, M. Miyamoto, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, K. Osamura, Y. Ohashi and N. Okumura: “Trial test of fully HTS induction/synchronous machine for next generation electric vehicle”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* in press
 - 26) K. Matsumura, T. Nishimura, T. Nakamura, R. Asai, D. Sekiguchi and N. Amemiya: “Constant torque/constant output characteristics

- of HTS induction-synchronous machine”, The 2010 annual meeting record I.E.E. Japan **5** (2010) 174 (in Japanese)
 松村一弘, 西村敏治, 中村武恒, 浅井力矢, 関口大輔, 雨宮尚之:「高温超電導誘導同期機の定トルク・定出力特性」, 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集 **5** (2010) 174
- 27) Superconductor Week (USA): “Kyoto U Demonstrates HTS-ISM Drive System”, **24** (23) (2010) 5-6
- 28) T. Nakamura, D. Sekiguchi, S. Misawa, H. Kitano, Y. Kawanishi, M. Fukui, T. Matsuo, M. Miyamoto, N. Amemiya, Y. Itoh, M. Yoshikawa, T. Terazawa, Y. Ohashi, N. Okumura, K. Osamura, J. Ogawa, S. Fukui and T. Oka: “Current status of high temperature superconducting induction/synchronous machine for automobile application”, Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2011 (ACASC2011), New Delhi, India (2011) IT -16
- 29) 特願 2009-124940 号
- 30) T. Konishi, T. Nakamura, T. Nishimura and N. Amemiya: “Fundamental study on improvement of power load characteristics applying high temperature superconductor motor for electrified railway”, IEEJ Trans. PE **131-6** (2011) 493-501 (in Japanese)
 小西武史, 中村武恒, 西村敏治, 雨宮尚之:「高温超電導電動機を電気鉄道に適用した電力負荷特性の向上に関する基礎検討」, 電学論 B **131-6** (2011) 493-501
- 31) T. Konishi, T. Nakamura, T. Nishimura and N. Amemiya: “Analytic evaluation of HTS induction motor for electric rolling stock”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1123-1126
- 32) T. Konishi, T. Nakamura and N. Amemiya: “Fundamental study on saving energy for electrified railway system applying high temperature superconductor motor and energy storage system”, IEEJ Trans. PE **132-5** (2012) 398-406 (in Japanese)
 小西武史, 中村武恒, 雨宮尚之:「高温超電導電動機と電力貯蔵装置の適用による電気鉄道の省エネルギー化に関する基礎検討」, 電学論 B **132-5** (2012) 398-406
- 33) T. Nakamura, Y. Ogama, K. Matsumura, T. Nishimura, K. Nagao, N. Kashima and S. Nagaya: “Fundamental study on generation characteristics of a HTS induction/synchronous machine”, TEION KOGAKU **44** (2009) 112-119 (in Japanese)
 中村武恒, 小蒲義夫, 松村一弘, 西村敏治, 長尾和昌, 鹿島直二, 長屋重夫:「高温超電導誘導／同期機の発電特性に関する基礎研究」, 低温工学 **44** (2009) 112-119
- 34) M. Kimura, K. Ide, K. Nishihama, M. Futami, M. Ichinose, T. Fujigaki, M. Iizuka, K. Imaie, Y. Yagi and J. Tamura: “A study of generator system selection for large wind turbine generator system”, IEEJ Trans. IA **126-3** (2006) 255-260 (in Japanese)
 木村 守, 井出一正, 西濱和雄, 二見基生, 一瀬雅哉, 藤垣哲朗, 飯塚元信, 今家和宏, 八木恭臣, 田村淳二:「大容量風力発電システムにおける発電機選定の一考察」, 電学論 D **126-3** (2006) 255-260
- 35) N. Maki: “Design study of high-temperature superconducting generators for wind power systems”, J. Phys.: Conf. Ser. **97** (2008) 012155 (6 pp)
- 36) H. Ohsaki, Y. Terao and M. Sekino: “Wind turbine generators using superconducting coils and bulks”, J. Phys.: Conf. Ser. **234** (2010) 032043
- 37) S. Fukui, J. Ogawa, T. Sato, O. Tsukamoto, N. Kashima and S. Nagaya: “Study of 10 MW-class wind turbine synchronous generators with HTS field windings”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1151 - 1154
- 38) T. Nakamura, Y. Yamada, H. Nishio, K. Kajikawa, M. Sugano, N. Amemiya, T. Wakuda, M. Takahashi and M. Okada: “Development and fundamental study on an induction/synchronous motor incorporated with MgB₂ cage windings”, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 014004 (7 pp)
- 39) T. Nakamura, H. Nishio, N. Amemiya, K. Kajikawa and T. Wakuda: “Performance of induction/synchronous motor having MgB₂ cage windings for liquid hydrogen circulation pump”, IEEE Trans. Appl. Supercond. in press
- 40) K. Kajikawa, H. Kuga, T. Inoue, K. Watanabe, Y. Uchida, T. Nakamura, H. Kobayashi, Y. Naruo, T. Wakuda and K. Tanaka: “Demonstration of transfer of liquid hydrogen using a pump system with MgB₂ wires”, 3rd International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2012), Istanbul, Turkey (2012) S-P-672
- 41) K. Kajikawa, H. Kuga, T. Inoue, K. Watanabe, Y. Uchida, T. Nakamura, H. Kobayashi, Y. Naruo, T. Wakuda and K. Tanaka: “Development of a liquid hydrogen transfer pump system with MgB₂ wires”, ICEC24-ICMC2012, Fukuoka (2012) 16A-OR2-06
- 42) K. Kajikawa, T. Kawano, R. Osaka, T. Nakamura, M. Sugano, M. Takahashi and T. Wakuda: “AC losses in monofilamentary MgB₂ round wire carrying alternating transport currents”, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 045026
- 43) K. Kajikawa, T. Kawano, R. Osaka, T. Nakamura, M. Sugano, M. Takahashi and T. Wakuda: “Dependence of transport-current losses in MgB₂ superconducting wire on temperature and frequency”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 2111-2114
- 44) K. Kajikawa, R. Osaka, T. Nakamura, M. Sugano and T. Wakuda: “AC loss evaluation of MgB₂ superconducting windings located in a stator core slot with a finite-element method”, J. Supercond. Nov. Magnet. **24** (2011) 987-991

中 村 武 恒 1969 年生。1993 年九州大学工学部電子工学科卒業。1998 年同大学院システム情報科学研究科博士後期課程（電気電子システム工学専攻）修了。同年京都大学勤務。2005 年同助教授，2007 年同准教授。主として，先進電気機器，車載システム，分散電源，超電導回転機と同マグネット技術開発に従事。低温工学・超電導学会，電気学会，応用物理学会，未踏科学技術協会（超伝導科学技術研究会），日本地球惑星科学連合会員。博士（工学）。