

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360137

研究課題名（和文） 水素タンクレス軽型燃料電池自動車の開発

研究課題名（英文） Development of Light-Weight Fuel Cell Electric Vehicle without High-pressure Hydrogen Tank

研究代表者

星 伸一（HOSHI NOBUKAZU）

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：70292480

研究成果の概要（和文）：粉状の水素化ホウ素ナトリウムを車上で加水分解し連続的に水素を生成することが可能な水素生成システムを開発した。また、永久磁石同期電動機の制御法を検討したほか、駆動用インバータと燃料電池、電気二重層コンデンサ間に接続して用いる直流-直流変換回路をそれぞれ開発した。さらに、開発した水素生成システムと燃料電池、燃料電池の出力に接続する直流-直流変換回路を軽型電気自動車のバッテリーの代わりに搭載し、試験走行に成功した。

研究成果の概要（英文）：An on-vehicle hydrogen generation system fueled by powdered sodium borohydride was developed in this research. The system can generate hydrogen continuously. In addition, control schemes for permanent magnet synchronous motor were investigated and dc-dc converters which were connected between inverter and fuel cell or electric double layer capacitor were developed. Moreover, the hydrogen generation system, fuel cell, and dc-dc converter connected between fuel cell and inverter were mounted on a light-weight electric vehicle instead of high voltage battery and the test driving were successful.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：燃料電池・電気自動車・改質・水素生成・水素化ホウ素ナトリウム・無機ハイドライド・電力変換・永久磁石同期電動機

1. 研究開始当初の背景

燃料電池ハイブリッド電気自動車（FCHEV: fuel cell hybrid electric vehicle）は、国内外の自動車メーカー各社で開発が進められているが、自動車に搭載した水素タン

クから供給した水素により燃料電池で発電し、走行するものが主流になっている。しかし、この方式では大きなタンクを積んだ上で、大規模なインフラ（水素ステーション）整備が必要となってしまう。セダクラスやミ

ニバンなどでは、ある程度大きな水素タンクを搭載可能であり、水素ステーションの数が多少少なくとも問題が無いかも知れないが、現在のガソリン車が普通乗用車から軽自動車へのシフトしていることを考えると、FCHEVについても地球温暖化防止の観点から軽型自動車での実用化を図る必要がある。しかし、軽自動車では搭載可能な水素タンクの大きさに限界があり大規模なインフラ整備が必要となってしまう。

ところで、水素の搭載方法の一つとして、水素分子を含有する化学物質から水素を取り出す方法がある。その一つの化学物質として、水素化ホウ素ナトリウム (NaBH_4) がある。米国の Millennium Cell 社は、U.S. DOE (米国エネルギー省) から助成を受けて、Chrysler 社などとともに実証試験を行っていたが、 NaBH_4 を水溶液化して燃料を搭載する方式を採用していたため、エネルギー密度が U.S. DOE の目標値に及ばず、この燃料については、“No Go”の裁定が下されていた。

2. 研究の目的

本研究は、水素化ホウ素ナトリウム (NaBH_4) の高い水素含有率に着目し、粉体のまま車に燃料として搭載する軽型 FCHEV の開発を目的に研究を行った。その主な特徴を以下に示す。

(1) 水素タンクレス化により大規模インフラ整備が不要となる。

(2) 水を循環使用することにより、水素生成にかかわる燃料積載量の低減を目指す。

(3) 高効率モータ制御法やエネルギーマネジメントシステムにより高駆動効率化を目指す。ことなどが挙げられる。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の項目について研究を行った。

(1) 本補助金を受ける前に有していた 1.2kW の燃料電池に水素ポンベから水素を供給し、発電を行い、供給水素量に対して、理論値に近い水が燃料電池で生成されるかを確認した。

(2) 本補助金を受ける前に入手していた軽型電気自動車 (ダイハツ ハイゼットバン EV, 以後ベース車両と呼ぶ) に搭載されているモータコントローラは、モータ制御プログラムの変更などが困難であるため、制御則が書き換え可能なコントローラおよびインバータに積み換え、検証実験を行った。

(3) 永久磁石同期電動機の制御法をいくつか検討し、試験ベンチや実車を用いた実験を行った。

(4) 燃料電池の出力電圧をモータ駆動用インバータが要求する電圧に昇圧するための直流一直流電力変換回路が必要となるため、この回路の設計製作を行った。

また、電気二重層キャパシタを使用することで、制動時に運動エネルギーを回収したり、加速時に燃料電池の出力電力の不足分を補ったりすることができる。この電力潮流制御を行うための電力変換回路の設計製作も行った。

さらに、これらの電力変換回路の制御法も検討し、実証試験を行った。

(5) 粉体の NaBH_4 の加水分解により水素を生成する水素生成システムを開発し、そのシステムで得られた発生した水素を 100W 及び 5kW の燃料電池に供給し、水素ポンベから得た水素で発電した場合と特性を比較した。

(6) 開発した水素生成システムと燃料電池、燃料電池と駆動用インバータの間に接続する直流一直流変換回路を軽型電気自動車のバッテリーの代わりに搭載し、試験走行を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた主要な成果を以下に示す。

(1) 理論上は、 NaBH_4 の加水分解に必要な水量の倍の水が燃料電池の発電時に生成される。したがって、この水を循環利用することで、提案システムのエネルギー密度向上が期待できる。このことを確認するために、1.2kW の燃料電池に水素ポンベを接続し、供給圧力を変化させて、発電実験を行った結果、表 1 に示すように NaBH_4 の加水分解するために必要な水量を、燃料電池の発電時に得られることが示された。なお、これらの得られた成果は、雑誌論文(7)などで発表した。

表 1 : 1.2kW の燃料電池から生成される水素生成量の
実験結果

水素圧力 (MPa)	0.2	0.4	0.8
水素消費量 (L)	46.49	46.21	46.74
理論水量 (mL)	37.6	37.4	37.8
生成水量 (mL)	31.7	32.0	33.0
生成割合 (%)	84.3	85.6	87.4

(2) 軽型電気自動車のコントローラを、積み換え、試験走行を行い、正しく走行できることを確認した。図 1 にそのシステム構成を示す。

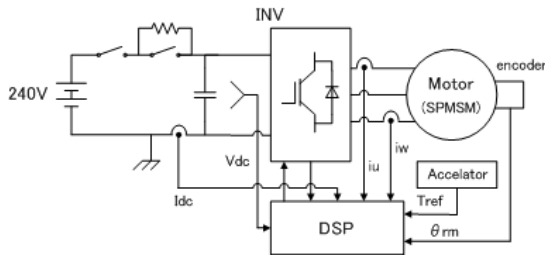


図1：コントローラ積み換え後の軽型電気自動車の駆動システム構成

(3) 永久磁石同期電動機の制御法を複数検討し、試験ベンチや(2)で改造した軽型電気自動車を用いて検証実験を行った。これらの得られた成果は、雑誌論文(5)、(6)などで発表した。

(4) 燃料電池—インバータ間、電気二重層キャパシタ—インバータ間にそれぞれ接続する2種類の直流—直流電力変換回路を設計製作した。燃料電池にとって出力電力の変動があまり好ましくないため、燃料電池—インバータ間に接続する変換回路には、三相インターリーブ方式を採用した。

また、電気二重層キャパシタ—インバータ間に接続する変換回路には、単相の双方向チョップを採用した。

これらの変換器に関する、制御法の検証や実験の結果などの成果は、雑誌論文(3)、学会発表(1)、(6)、(7)、(8)で発表した。

(5) 粉体のNaBH₄を燃料として水素を生成する水素生成システムを試作し、実験によりその性能を評価した。図2に示すように、開発した水素生成システムでは、一定流量の水素を連続生成できることを確認した。これら得られた成果は、雑誌論文(2)、学会発表(9)などで発表した。

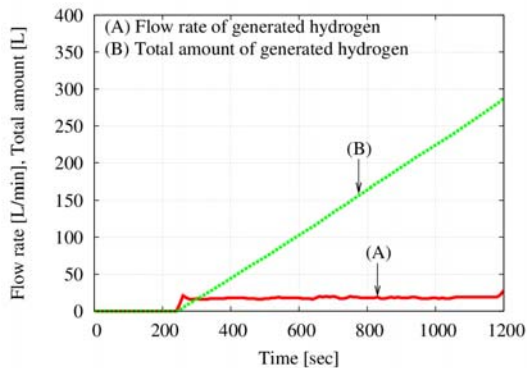


図2：開発した水素生成器による水素生成時の水素流量と発生水素総量

また、NaBH₄の加水分解により生成した水素で燃料電池を駆動することで、燃料電池が劣化してしまうかどうかを、最初に100Wの燃料電池を用いて検証した。この実験では、まず、水素ボンベから圧縮水素を供給し燃料電池の電圧電流特性を測定した(図3の”Hydrogen gas tank (1st)”)。次に、提案水素生成器によりNaBH₄の加水分解を行い発生した水素を供給し、燃料電池の電圧電流特性を測定した(同図”NaBH₄”)。さらに、劣化が生じるか確認するため、再び水素ボンベから水素を供給し、電圧電流特性を測定した(同図”Hydrogen gas tank (2nd)”)。この結果より、いずれの特性もほぼ同等であり、提案水素生成器を用いた場合でも、大幅な性能低下が生じないことが確認できた。なお、この結果は、雑誌論文(4)などで、発表した。

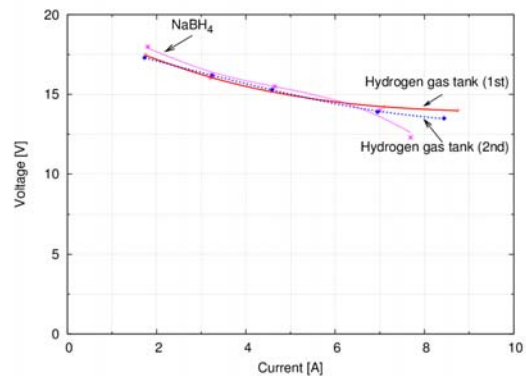


図3：水素供給方式の違いによる燃料電池の電圧—電流特性の比較

さらに、低温時に提案水素生成システムを始動する場合に、ヒータを用いて水を加熱するために起動時間が掛かり損失も発生していたため、この改善方法としてクエン酸を添加して、急速に水素生成できることを明らかにした。この結果は、雑誌論文(1)、学会発表(4)、(5)などで発表した。

そのほか、提案水素生成システムの車載に際し水素圧力の自動制御が必要であったため、その方法を検討し、実験により、提案水素圧制御法が有効に機能することを確認した。この結果は、学会発表(2)で発表した。

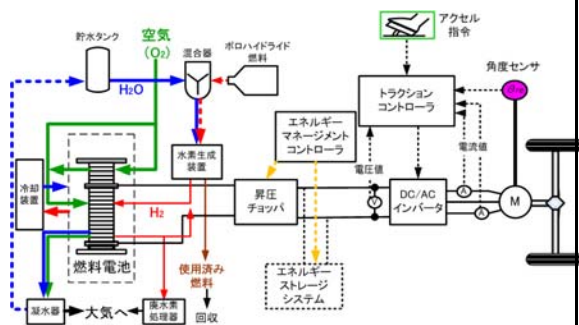
(6) (2)でコントローラを積み換えた軽型電気自動車のバッテリーの代わりに、水素ボンベと燃料電池、(4)で製作したインターリーブ方式直流—直流変換回路を搭載し、試験走行を行い、燃料電池自動車として走行できることを確認した。この成果については、学会発表(3)で発表した。

次に、水素ボンベに換え、提案水素生成システムを搭載し、試験走行を行った。この試

験走行により、(5)で提案した水素圧力制御も正しく機能し、粉体の NaBH_4 を燃料として軽型燃料電池自動車が行走できることを確認した。試験走行を行った軽型燃料電池車の外観を図4に、システム構成を図5に示す。また、この試験車両に搭載した、水素生成システム及び燃料電池の外観を図6に示す。



図4：試験走行を行った軽型燃料電池電気自動車の外観



※今回の試験走行では、エネルギーストレージシステム（双方向チョップ+電気二重層コンデンサ）と水循環機構は搭載していない。

図5：提案水素生成方式を用いた燃料電池ハイブリッド電気自動車のシステム構成

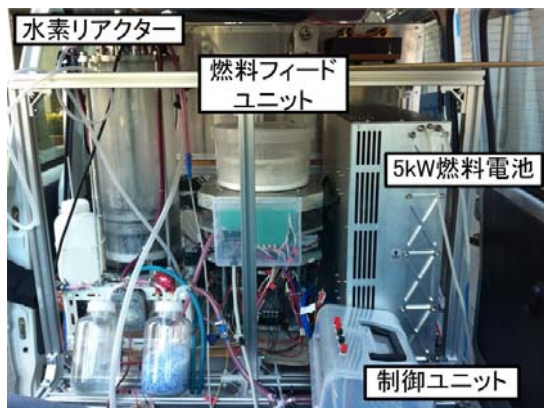


図6：車載した提案水素生成システムと燃料電池の外観

なお、試験走行の成功については、東京理科大学科学技術交流センターを通じて、プレスリリースを発行した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- (1) Keisuke TOMODA, Nobukazu HOSHI, Junnosuke HARUNA, Meifen CAO, Atsuhiko YOSHIZAKI, and Keiichi HIRATA, ``Accelerating Velocity of Hydrogen Generation from Sodium Borohydride by Citric Acid Catalyst'', *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012)*, pp.1-6, CD-ROM, (2012-11). 査読 無, DOI: 10.1109/ICRERA.2012.6477320
- (2) Shinichiro MUROOKA, Keisuke TOMODA, Nobukazu HOSHI, Junnosuke HARUNA, Meifen CAO, Atsuhiko YOSHIZAKI and Keiichi HIRATA, ``Consideration on Fundamental Characteristic of Hydrogen Generator System fueled by NaBH_4 for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle'', *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC2012)*, pp. 1-6, CD-ROM, (2012-3). 査読 無, DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183289
- (3) Satoshi HIRANUMA, Tomohiro TAKAYANAGI, Nobukazu HOSHI, Junnosuke HARUNA, Meifen CAO, ``Experimental Consideration on DC-DC Converter Circuits for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle'', *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC2012)*, pp. 1-8, CD-ROM, (2012-3). 査読 無, DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183264
- (4) 室岡慎一郎, 友田圭祐, 星伸一, 曹梅芬, 吉崎敦浩, 平田敬一: ``燃料電池電気自動車の燃料として見た水素化ホウ素ナトリウムの有効性検証'', *電気学会産業応用部門誌*, Vol. 132, No. 2, pp. 299-300, (2012-2). 査読 有, DOI: 10.1541/ieejias.132.299
- (5) Masashi Kajino, Nobukazu Hoshi, Meifen Cao, ``Comparison of Driving Characteristics in Two Kind of Control Schemes for Permanent Magnet Synchronous Motor Mounted on Electric Vehicle'', *International Power Electronics Conference -ECCE ASIS-*, pp. 1969-1975, (2011-6). 査読 無, DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944445

- (6) Meifen Cao, Nobukazu Hoshi, ``Electrical Loss Minimization Strategy for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives'', *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1--6, USB, (2010-9). 査読無, DOI: 10.1109/VPPC.2010.5729094
- (7) Yosuke Sakamoto, Nobukazu Hoshi, Shinichiro Murooka, Meifen Cao, Atsuo Yoshizaki, Keiichi Hirata, ``Basic Study on Fuel-Cell-Hybrid-Electric-Vehicle Fueled by Sodium Borohydride'', *Proc. on The 2010 International Power Electronics Conference -ECCE ASIA-*, pp.814-819, CD-ROM, (2010-6) 査読無, DOI: 10.1109/IPEC.2010.5543311

[学会発表] (計 12 件)

- (1) 星秀之, 成澤拓真, 高柳朝裕, 星伸一, 春名順之介, 曹梅芬, ``燃料電池自動車に用いる電力変換回路の特性評価'', 電気学会研究会資料, VT-13-001, (2013-1-15). 査読無
- (2) 友田圭祐, 星伸一, 春名順之介, 曹梅芬, 吉崎敦浩, 平田敬一, ``水素化ホウ素ナトリウムを用いた燃料電池車用水素供給システムの水素圧制御法'', 電気学会研究会資料, VT-13-002, (2013-1-15). 査読無
- (3) 成澤拓真, 高柳朝裕, 星伸一, 春名順之介, ``燃料電池自動車の走行特性に関する実験的考察'', 電気学会研究会資料, SPC-12-185/VT-12-036/HCA-12-070, (2012-12-7). 査読無
- (4) 友田圭祐, 星伸一, 春名順之介, ``水素化ホウ素ナトリウムの加水分解反応における水素生成速度改善効果の実験的検証'', 平成 24 年電気学会産業応用部門大会, pp. Y-122, (2012-8-21). 査読無
- (5) 友田圭祐, 室岡慎一郎, 星伸一, 春名順之介, 曹梅芬, 吉崎淳浩, 平田敬一, ``クエン酸の添加による水素化ホウ素ナトリウムの低温時における水素生成速度の改善'', 平成 24 年電気学会全国大会, Vol. 7, pp. 9-10, (2012-3-22). 査読無
- (6) 平沼聡, 高柳朝裕, 星伸一, 春名順之介, 曹梅芬, ``燃料電池に接続した昇圧チョップの駆動特性に関する一考察'', 電気学会研究会資料, EDD-11-057/SPC-11-149, (2011-10-27). 査読無
- (7) Tomohiro TAKAYANAGI, Nobukazu HOSHI, Junnosuke HARUNA, Meifen CAO, ``Experimental Discussions on

Inductor Current Balance Control for Interleaved Boost Converter'', *2011 Japan-Korea Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter*, pp. 55-58, (2011-10-22). 査読無

- (8) 高柳朝裕, 星伸一, 春名順之介, ``燃料電池ハイブリッド自動車の走行モードを模擬した条件におけるチョップ回路の実験的考察'', 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, p. Y-13, (2011-9-6). 査読無
- (9) Nobukazu Hoshi, Shinichiro Murooka, Meifen Cao, Atsuo Yoshizaki, Keiichi Hirata, ``Improvement of Energy Density of Hydrogen Generator System using Sodium Borohydride for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle'', *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1--3, USB, (2010-9-1). 査読無
- (10) 室岡慎一郎, 星伸一, ``高圧水素タンクレス燃料電池自動車の開発に向けた水素化ホウ素ナトリウムの特性評価'', 平成 22 年電気学会産業応用部門大会, p. Y--104, (2010-8-24) 査読無
- (11) 室岡慎一郎, 坂本洋輔, 倉内修司, 星伸一, 曹梅芬, ``無機ハイドライドを燃料とする燃料電池電気自動車開発に向けた基礎研究'', パワーエレクトロニクス学会第 181 回定例研究会資料, JIPE-35-53, (2009-12-19) 査読無
- (12) 栗山基, 星伸一, 宮武昌史, 吉崎淳浩, 平田敬一, ``小型燃料電池自動車への水素積載システム設置に関する基礎研究'', 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, Y-93, (2009-8-31) 査読無

[図書] (計 1 件)

- (1) 星伸一, ``燃料電池自動車の新潮流！粉末燃料で走る FCEV の特長と将来展望'', 月刊「ビジネスアイ エネコ」, 2013 年 5 月号, pp.30—33.

[その他]

- (1) 東京理科大学科学技術交流センタープレスリリース, 「世界初！粉体の水素化ホウ素ナトリウム (NaBH₄) を燃料として走行する燃料電池電気自動車の試験走行に成功！」
<http://www.tus.ac.jp/tlo/new/pdf/130122.pdf>
- (2) 新聞等報道
① 粉体 NaBH₄ 燃料の FCEV 東京理科大学が試験走行に成功, 化学工業日報 (東京), 2013 年 1 月 25 日

- ② 燃料に水素化ホウ素ナトリウム FCV 試験走行成功, 日刊工業新聞, 2013 年 1 月 28 日
- ③ 「粉末水素」の燃料電池車, 日経産業新聞, 2013 年 1 月 30 日
- ④ 水素化ホウ素ナトリウムを燃料とした燃料電池車 (FCV) の試験走行に成功, Fuji Sankei Bussiness i., 2013 年 2 月 20 日
- ⑤ 燃料電池車”軽”化に前進・水素化ホウ素ナトリウム活用走行試験に世界初成功, 電気新聞 (東京), 2013 年 2 月 26 日
- ⑥ 粉末で走る燃料電池車, 朝日新聞 (東京) 夕刊, 2013 年 3 月 27 日
- ⑦ 世界初, NaBH₄ 燃料電池 EV の走行に成功, 自動車工学, 2013 年 4 月号

(3) 受賞

- ① International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012) Outstanding Paper Award (研究代表者、研究分担者、研究協力者)
- ② International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012) Student Excellent Presentation Award (研究協力者)
- ③ 平成 24 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション優秀発表賞 (研究協力者)
- ④ 平成 22 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション優秀発表賞 (研究協力者)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

星 伸一 (HOSHI NOBUKAZU)
東京理科大学・理工学部・准教授
研究者番号：70292480

(2) 研究分担者

曹 梅芬 (CAO MEIFEN)
東京都立産業技術高等専門学校・
ものづくり工学科・教授
研究者番号：50390430