

平成 28 年度環境省委託事業

平成 28 年度低炭素型 3 R 技術・システム実証事業

HVユニットをリユースした
小型風力発電システムを構築する
仕組み作り

報告書

平成29年3月1日

豊田通商株式会社

要約

1997年に初代プリウスが初めてハイブリッド自動車（以下HV車）として発売されてから今年で20年、既に900万台以上のHV車が市場に投入されており、今後使用済みのHV車（以下HV廃車）が続々と出回ってくる見込みである。HV廃車への3Rの取り組みは、モーターからの希土類磁石の回収や、バッテリーの定置型へのリビルト等種々行われてきたが、どれも技術的には成立しても、経済性に乏しく、未だに、資源循環のスキームが確立していないのが現状である。

そこで、今回は、全く新しい、今までにない取組として、HV廃車の主要部品であるHVユニット（モーター、バッテリー、インバータ等）をそのままリユースする事を試みた。通常HVユニットは、高度にIT化、暗号化されているため、リユースが困難であったが、この度、製造元であるトヨタ自動車（株）の絶大な協力を得て、実現を可能とした。又、年式から現在一番廃車として市場に出回っている「2世代プリウス」に特化して取り組んだ。

リユースする先についても、種々考察がなされたが、経済性を重視して、HVユニットの中で本来一番価値の高いモーターを如何に効率よくリユースするかを基本思想として、モーターを中心として、発電システムを構築する事に着眼した。

おりから、再生可能エネルギーによるCO2削減のニーズが高まっている中、小型風力発電については、その設置コスト高により普及が現状進んでいない。今回のHVユニットのリユースによるコスト競争力のある小型風力発電システムの仕組み作りは、新規性と社会のニーズに即したものであると判断し、本実証事業「HVユニットをリユースした小型風力発電システムを構築する仕組み作り」に着手した。

実証事業報告書は、「① HVユニットの回収及びその性能評価の仕組み作り」「② 回収した部品や他車載部品の風車仕様への変更によるコストパフォーマンスの高い風力発電システム仕様作り」「③ 小型風車を利用した発電事業の経済性評価」「④ 本事業による環境負荷低減効果」「⑤ 事業実現の可能性」「⑥ 今後の見通し」といった構成になっている。

「①回収及び性能評価」については、事前に用意された「HVユニット回収マニュアル」に沿って、日本国内の回収業者4社にて合計16台の2世代プリウスから各台15部品の回収実証試験を行い、その性能を評価した。試験を通じて、各社とも通常のガソリン車並みの所要時間（約2時間内）にて作業が完了し、回収した部品の性能も全て良品である事が確認できた。モーターへバッテリーを通じ電流を流し、その稼働の応答性を見る事で風車の部品として十分性能がある事が豊通リサイクル（株）にて検証された。結論として、①については、技術的・経済的に成立する事が、確認された。

「②風力発電仕様作り」においては、回収した部品について、それぞれ、ソフト的・メカ的な仕様変更を風車部品として使用できるように行った。

ソフト面では、車載上HVユニットを制御している「HV-ECU」を、今回風力発電システムを制御する（株）ジェイテクト製TOYOPUCと通信できる機能に仕様変更し、HV制御システムをそのままリユースする事を可能にした。これは、（株）トヨタタービンアンドシステムの協力を得て実現した。

さらにこの制御システムにより、風車の回転を積極的に管理し、HVユニットのメリットである、バッテリー、インバータを駆使して通常よりも発電性能が高い、制御アルゴリズムを（株）ジェイテクトの協力で開発した。開発に先立って、過去の風速と風車回転数の相関をマトラボによりモデル化し、風況に応じて実測と同じ環境を再現するシミュレーターを（株）豊通エレクトロニクスの協力で構築し、制御アルゴリズムの検証を実機条件と同じ精度で行う仕組み作りをした。

アルゴリズムに沿って（大）鳥取大学にてシミュレーションを行った結果、風速5m/sにて28千kWh/年という大変良好な発電量が確認できた。HV制御を利用した風車制御システムは、発電性能を大幅向上させる事が検証された。

メカ的には、先ず製造元であるトヨタ自動車（株）と連携して心臓部であるHVモーターの特性を良く調査して、発電機としてリユースする際に最大効率が発揮できる仕様を定めた。その際に、信頼性評価も十分に行い必要な改造方法も決定した。これにより、回収したHVユニットは、その年式や走行距離による品質のバラツキを危惧する事なく、全て風車の主要部品としてリユースできる仕組が構築された。次に駆動部である、風車軸、増速機、結合部についても車載仕様と風車仕様の違いをよく精査し、日野自動車（株）の指導下で、（株）ジェイテクトにて改造設計を行った。新規に製造した風車軸については、特に念入りに、パイロット試験を豊精密工業（株）で行い、強度の検証を行った。

風車の安全運転のポイントとなるブレーキについては、トラック用ブレーキの風車仕様への改造を行い、付属のエア回路についても日野自動車（株）の指導を受けて構築した。これにより、制御とメカを併用しての風車回転の減速、停止が可能となった。

高度にIT化されたHVユニットの性能を担保するために、できるだけ車載時と同じ環境でリユースすべく、関連の冷却システムについても回収・リユースの対象とした。

上記のように、全ての車載部品については、適切な仕様変更をする事により、コスト競争力があり、品質の高い風車部品として生まれ変わる事が可能である事が確認された。

このように仕様変更した各部品で製作された風車の「全体システム設計」に対する解析業務を大型風車で実績のあるDNV・GL（株）に依頼し、信頼性を確実なものとした。

最後に、騒音等、風車をもたらす可能性のある環境影響評価も同タイプの風車にて調査を実施し、問題ない事を確認した。

次に、「③ 本事業の経済性評価」を行った。評価は、実証した風車の生産コストと発電性能を前提条件として、独立電源として利用する場合（オフグリッド）と売電事業として利用する場合（オングリッド）でそれぞれ行い、結果として、今後の事業化による量産コスト削減効果を見込まなくても現在の性能で十分に経済性がある（投資額回収が12年以内）との結論に至った。

「④ 本事業の環境負荷低減効果」では、直接効果として、機能単位をHV車一台とし、バウンダリを廃車から風車製作まで（製造段階）とし、リユースする事によるCO2削減効果と天然資源消費量削減効果を定量的に算出する事で評価した。結果、前者では、0.60t-CO2/台の削減。後者は、351kg/台となり、環境負荷低減効果を確認した。また、間接効果として、製作された風車による発電プロセスまで（運用段階）も評価し、結果、ライフサイクルとして42.75t-CO2/台・20年の環境負荷低減効果を確認した。

「⑤ 本事業の実現可能性」については、技術的観点・経済的観点の両面から検証した。HVユニットの回収時、回収した部品のリユース時、リユースした後の発電システム全てにおいて、本実証を通じて、技術的な問題がない事が確認された。また、今後単品ではなく事業として行う場合の工数や工程、場所の確保等課題について整理した。さらに、環境面での大型風車と小型風車との比較や、回収する対象部品の発生頻度及び現在の市場価格、小型風力発電の市場規模にも言及し、本事業の実現の妥当性について整理した。環境負荷低減効果について、今後の量産時を想定して製造段階の直接効果と運用段階の間接（波及）効果に分けて示し、間接効果が実現する定性的な要因についても考察した。

「⑥ 今後の見通し」として、事業化へ向けてのマイルストーンを示し市場ポテンシャルも明示した。マイルストーン毎の内容についてもできるだけ詳細を記述した。

今回のHVユニットのシステム全体のリユースは、単なる部品単品でのリユースではなく、新たな製品への再組立て（リボーン）となる。さらにその製品の性能が優れ、コスト競争力もあり、現代社会のニーズである環境負荷低減に貢献する事から、実に画期的な事である。本事業では2世代プリウスを対象に風車へのリユースを企画したが、同じスキームにて2世代の3倍近く販売された3世代プリウス、単品で最高の販売台数を記録しているアクア等のHV車、更に今後増加するPHV車、EV車についての取り組みの方向性を最後に明示した。HV車は年代式毎に進化しており、例えば、モーターは、その出力、効率が高まって行き、バッテリーは、容量が増加している。繰り返しになるが、今回は、ユニットとしてリユースしているので、HV車が、PHV車やEV車に変わっても、ユニットを構成する部品に変化がなければ、同じ仕組みが適用可能である。さらにユ

ニットを構成する部品の品質が向上すれば、リユース先の性能も向上し、コストパフォーマンスの高い新製品へと生まれ変わり続ける。この仕組み作りが本事業であった。

Summary

This year marks 20 years since the first-generation Prius first went on sale as a hybrid vehicle (hereinafter "HV car") in 1997, and more than 9 million HV cars have already been put on the market. It is therefore to be expected that more and more used scrap HV cars (hereinafter "scrap HV cars") will appear in the future. A variety of 3R initiatives for scrap HV cars have been carried out, including the collection of rare earth magnets from motors and rebuilding the batteries to make them stationary-type, but in all cases, even though they may have been established technologically, they lack economic viability, and the current situation is that a resource recycling scheme has still not been established.

This time then, as a completely new initiative that has never been done before, we tried reusing the HV units (motors, batteries, inverters, etc.), which are the main components of scrap HV cars, as they are. Since HV units are usually highly computerized and encrypted, reusing them has been difficult, but this time, we were able to make it possible thanks to tremendous cooperation from the manufacturer, Toyota Motor Corporation. Furthermore, for our initiative, we specialized in the "second-generation Prius," which, determined from the model year, has been appearing the most on the current market as a scrap car.

A variety of possibilities have been examined with regard to ways to reuse, but placing the importance on economic viability, we made our basic thinking how to efficiently reuse the motor, which intrinsically has the highest value among all the HV units, and looked at constructing power generation systems with the motor as the core.

The current situation is that, amid increasing need for CO2 reductions by means of renewable energy, the spread of small-scale wind power generation is not making much progress because of the high cost of installation. Concluding that creating a framework for small-scale wind power generation systems that would be cost-competitive as a result of this reuse of HV units was something that would reflect both innovation and society's needs, we commenced work on the present demonstration project, "Creating a framework for the construction of small-scale wind power generation systems that reuse HV units."

The demonstration project report was structured into "(1) Creating a framework for the collection of HV units and for evaluating the performance of same," "(2) Creating a specification for wind power generation system with high cost performance through the modification of collected parts and other in-vehicle parts to a windmill specification," "(3) An economic evaluation of a power generation business using small-scale windmills," "(4) Environmental burden reduction effects resulting from the project," "(5) Feasibility of project realization," and "(6) Future prospects."

With regard to "(1) Collection and performance evaluation," we conducted a demonstration test for the collection of, and evaluated the performance of, 15 parts each from a total of 16 second-generation Priuses, by four collection operators within Japan, in accordance with an "HV Unit Collection Manual" that had been prepared in advance. Through the test, we were able to confirm that for each company, the work was completed in a time that was comparable to that required for a normal gasoline car (less than about 2 hours), and that all the collected parts were good in terms of performance. By running electrical current

through the batteries to the motors and looking at the responsiveness of their operation, it was verified by Toyotsu Recycle Corporation that the parts had sufficient performance as parts for windmills. The conclusion was that with regard to (1), both technological and economic viability were confirmed.

For "(2) Creating a wind power generation specification," we carried out both software and mechanical specification modifications with regard to each of the collected parts so that they could be used as windmill parts.

With regard to the software aspect, we made it possible to reuse the HV control system as it was by taking the "HV-ECU," which controls the in-vehicle HV units, and modifying the specifications to give it a functionality by which it would be able to communicate with TOYOPUC, which is manufactured by JTEKT Corporation and was going to control the wind power generation system this time. This was achieved with the cooperation of Toyota Turbine and Systems Inc.

Furthermore, with the cooperation of JTEKT Corporation, we developed a control algorithm with even higher power generation performance than usual, which made full use of the HV units' strengths, namely their batteries and inverters, and would actively manage the rotation of the windmill by means of this control system. Before development, we used MATLAB to model the correlation between past wind speeds and windmill rotational speeds, and with the cooperation of Toyota Tsusho Electronics Corporation, constructed a simulator that would recreate the same environment as the measurements in response to wind conditions, then created a framework for carrying out verification of the control algorithm with the same precision as under real-equipment conditions.

As a result of performing a simulation at Tottori University in accordance with the algorithm, we were able to confirm an extremely good power generation of 28,000 kWh at a wind speed of 5 m/s. It was verified that the windmill control system using HV control substantially improved power generation performance.

For the mechanical aspect, first, in cooperation with the manufacturer, Toyota Motor Corporation, we thoroughly investigated properties of the HV motor, which is the part that is the heart, and determined a specification by which it would be able to demonstrate maximum efficiency when reused as a power generator. When we did this, we also thoroughly evaluated the reliability, and decided on how to make the necessary remodeling. On the basis of this, a framework was constructed that would enable all the collected HV units to be reused as the main components for windmills, without the need to worry about variations in quality resulting from their model year or mileage. Next, we thoroughly investigated the differences between the in-vehicle specifications and windmill specifications with regard also to the drive components (that is, the windmill shaft, step-up gears, and couplings), and under the guidance of Hino Motors, Ltd., carried out the remodeling design work at JTEKT Corporation. With regard to the newly manufactured windmill shafts, we carried out pilot tests at Yutaka Seimitsu Kogyo, Ltd. with particular care, and conducted verifications of their strength.

With regard to the brakes, which are the key point in the safe operation of a windmill, we remodeled truck brakes to a windmill specification, and constructed the associated air circuit with guidance from Hino Motors, Ltd. As a result of this, it became possible to slow down and stop the rotation of the windmill by using control and mechanical elements together.

In order to secure the performance of the highly computerized HV units, we also targeted the related cooling systems for collection and reuse, so as to

reuse the units in an environment that would as far as possible be the same as when they were in-vehicle.

As stated above, it was confirmed that all the in-vehicle parts would be able to be reborn as cost-competitive, high-quality windmill parts by making appropriate specification modifications.

We made reliability a certainty by asking DNV GL, which has a proven track record in large-scale windmills, to carry out the analysis work for the "overall system design" of the windmills made using the parts whose specifications had been modified in this way.

Finally, in order to evaluate any environmental impact, such as noise, that the windmills might have, we carried out an investigation using windmills of the same type, and confirmed that there were no problems.

Next, we carried out "(3) An economic evaluation of the business." With the demonstrated windmill production cost and power generation performance as preconditions, we carried out respective evaluations for the case of use as an independent power source (off-grid) and for the case of use as a power-selling business (on-grid), and as a result, we reached the conclusion that even if there were not expected to be any mass-production cost-reduction effects as a result of future commercialization, there was sufficient economic viability (recovery of investment within 12 years) with the current performance.

For "(4) Environmental burden reduction effects of the project," for direct effects, we carried out an evaluation by quantitatively calculating the CO₂-reduction effects and natural resource consumption reduction effects that would result from reuse, taking one HV car to be the functional unit and taking the boundary to be from scrap car to windmill production (the manufacturing stage). The result for the former was a reduction of 0.60 t-CO₂/car. For the latter, it was 351 kg/car, confirming an environmental burden reduction effect. In addition, for indirect effects, we carried out an evaluation up to the process of power generation by manufactured windmills (the operation stage), and, as a result, confirmed environmental burden reduction effects of 42.75 t-CO₂/car as a form of life cycle assessment for 20 years.

We also verified "(5) Feasibility of the project" from both the technical and economic perspectives. Through this demonstration, it was confirmed that there would be no technical problems in any of the stages from when the HV units were collected, to when the collected parts were reused, to the power generation systems after they had been reused. We also clarified matters with regard to the issues that would arise if they were carried out in the future as a business rather than singly (such as the man-hours, processes and securing of locations). In addition, we also discussed matters such as the comparison of large-scale windmills and small-scale windmills with regard to their environmental aspects, the frequency of occurrence and current market price of the target parts for collection, and the scale of the market for small-scale wind power generation, and clarified matters with regard to appropriateness of making this business a reality. We indicated the environmental burden reduction effects by separating them into direct effects in the manufacturing stage and indirect (ripple) effects in the operation stage on the assumption of mass production in the future, and examined the qualitative factors involved in the indirect effects' being realized.

As "(6) Future prospects," we indicated the milestones on the way to commercialization, and clarified the market potential. We also discussed the content of each milestone in as much detail as possible.

In this reuse of the overall system HV units, the components are not simply reused as single parts; rather, they are reassembled into a new product (reborn). Furthermore, the performance of that product is outstanding, it is cost-competitive, and will contribute to reducing the environmental burden, something that modern society needs, all of which make it a truly epoch-making achievement. In this project, we targeted second-generation Priuses and planned to reuse them in windmills, but at the end, we also clarified the direction for initiatives using the same scheme with regard to HV cars such as third-generation Priuses (of which close to three times the number of second-generations were sold) and Aquas (which individually recorded the highest number of cars sold), and furthermore for PHV cars and EV cars, whose numbers will increase in the future. HV cars are evolving with each generation and model: for example, the output and efficiency of their motors are improving, and the capacity of their batteries is increasing. We have said it before, but this time we have reused the parts as a unit, so even if HV cars change into PHV cars and EV cars, provided there is no change in the parts that comprise the unit the same framework will still be applicable. Furthermore, if the quality of the parts that comprise the unit improves, the performance of the things that they are reused in will also improve, and they will continue to be reborn as new products with high cost performance. The creation of this framework was what this project was about.

事業実施体制

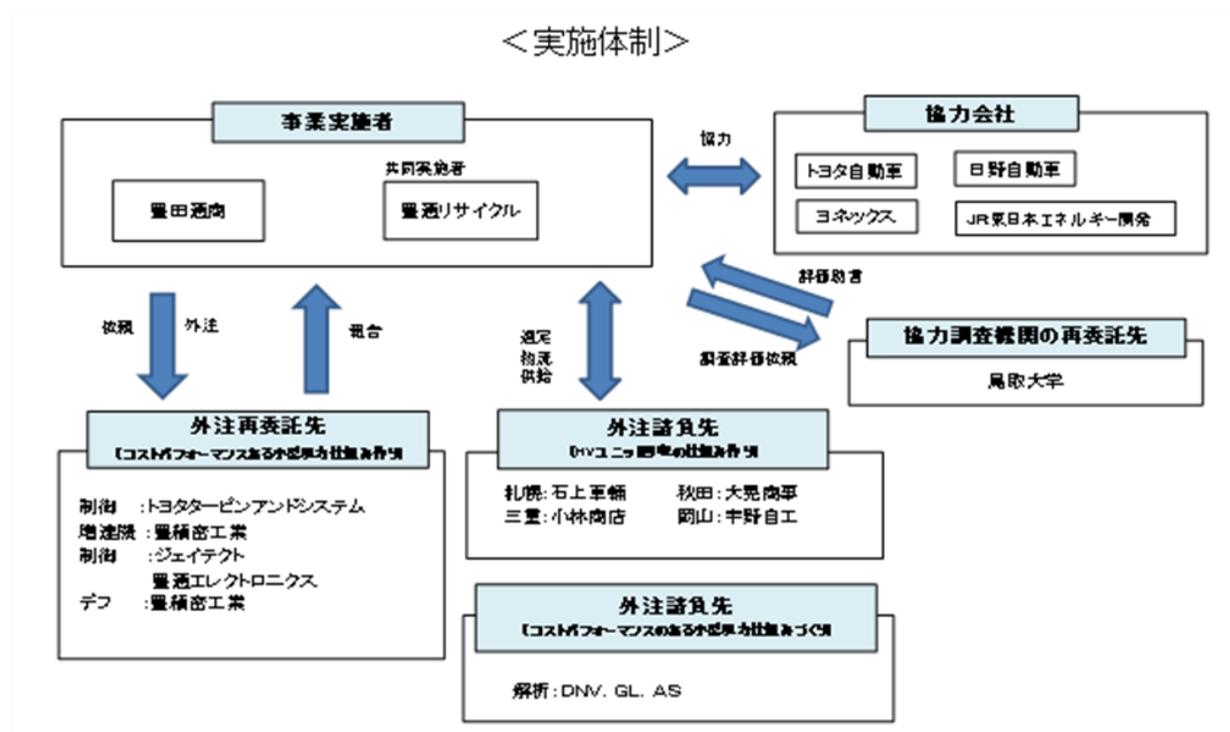
山岸 直人	豊田通商株式会社	環境・リサイクル事業推進部	部長職
赤石 優	豊田通商株式会社	環境・リサイクル事業推進部	課長職
柘植 裕子	豊田通商株式会社	環境・リサイクル事業推進部	

(共同実施者)

杉山 茂弘	豊通リサイクル株式会社	工場長
稲川 憲司	豊通リサイクル株式会社	
川端 康己	豊通リサイクル株式会社	
長尾 純一	豊通リサイクル株式会社	

(協力者)

トヨタ自動車株式会社
 株式会社ジェイテクト
 株式会社トヨタタービンアンドシステム
 国立大学法人鳥取大学
 豊精密工業株式会社
 株式会社豊通エレクトロクス



目次

要約/ Summary

事業体制

I.	背景と目的	1
II.	実証方法	2
II-1.	全体概要	2
II-2.	各実施事項	2
III.	HVユニットを回収し、回収部品の性能評価するスキーム	5
III-1.	HVユニットを回収するスキームの確立	5
III-2.	回収した部品に対する性能（動作）試験結果	11
IV.	リユースユニット及び車載部品を最大限使用したコストパフォーマンスの高い純国産小型風力発電システムの仕様策定	18
IV-1.	小型風力発電システムの仕様作成	18
IV-2.	車両制御ユニットの風力発電転用のための仕様作成	20
IV-3.	風車回転速度の最適化アルゴリズム開発	24
IV-4.	HVモーターの風車仕様での性能・信頼性評価	31
IV-5.	車載用デフ等の転用仕様作成	36
IV-6.	エアードィスクブレーキ	39
IV-7.	回収した冷却システムの風車でのリユース実証試験	46
IV-8.	風車全体システム信頼性評価	51
IV-9.	小型風力発電システムの環境影響評価試験（騒音試験）	53
V.	HVユニットを利用した小型風力発電事業の経済性評価	56
V-1.	HVユニット利用小型風車のイニシャルコスト	56
V-2.	HVユニット利用小型風車の発電性能	58
V-3.	経済性評価の結果	60
VI.	環境負荷低減効果	64
VI-1.	CO2削減効果（HVシステムのリユース）	64
VI-2.	天然資源消費量（HVシステムのリユース）	78
VI-3.	その他の環境負荷低減効果	80

VII. 事業実現可能性等	86
VII-1. 技術的实现性	86
VII-2. 経済的实现性	89
VII-3. 環境適合性	90
VII-4. 回収対象の発生量と市場規模の妥当性	91
VII-5. 量産化した場合の事業全体での環境負荷低減効果	93
VIII. 今後の見通し	96
VIII-1. 回収事業の高度化	96
VIII-2. 回収品への検査機能強化	96
VIII-3. 海外での回収スキーム確立	97
VIII-4. 小型風力発電システムの実機での実証試験	97
VIII-5. 量産体制の確立	98
VIII-6. ビジネスプランの企画・立案	98
VIII-7. 海外市場調査	98
VIII-8. リユースモデルの拡大	99

I. 背景と目的

ハイブリッド自動車（以下HV車）基幹ユニット（以下HVユニット）は、駆動装置としての性能に極めて優れ、また耐久性等の面で高い品質を備えていることから、自動車車両の寿命を大きく超えてリユース部品として利用可能である。しかし、高度に電子化、暗号化されていること等からリユースを困難にしていた。

また、再生可能エネルギーの中でも小型風車は、電力固定価格買取制度（FIT）で高い買取り価格が設定されているにも関わらず、設備コストの高さが障害となって十分普及していない。

この度HVユニット及び同様に、コストが低く、信頼性の高い車載用部品を多く風車に転用することで、コストパフォーマンスの高い純国産小型風力発電システムを開発した。これにより、それぞれの部品単品でのリユースを超えた「ユニットそのものをリユースする＝従来のリユースを超えたりボーン」という全く新しいビジネスモデルを構築する仕組み作りを行う。結果として、従来はマテリアルリサイクルを前提としていた回収事業の付加価値を高め、回収力も向上させることで、日本における資源循環の促進を目指す。

風車の性能についてもHVユニットの制御システムを風車仕様として活用し、風車の制御性能を向上させる事で、同一規格、同一環境下にて現在市場で販売されている風車より高い発電性能の達成を目指す。

上記を通じて、リユースによる直接的な環境負荷低減効果とさらに性能が高い風車から生まれるクリーンエネルギーによる間接的な環境負荷低減効果を生み出す。

II. 実証方法

II-1. 全体概要

本実証事業では、大きく分けて以下4事項について実証を行い、これらを踏まえて環境負荷低減効果の検証、また事業実現可能性等の検証を行った。

- ・ HVユニットを回収し、回収品の性能評価するスキームの確立（Ⅱ-2. 1）
- ・ リユースユニット及び車載部品を最大限使用したコストパフォーマンスの高い純国産小型風力発電システムの仕様作り（Ⅱ-2. 2）
- ・ HVユニットを利用した小型風力発電事業の経済性評価（Ⅱ-2. 3）
- ・ 小型風力発電システムが環境へ及ぼす影響評価（Ⅱ-2. 4）

II-2. 各実施事項

1. HVユニットを回収し、回収品の性能評価をするスキームの確立

日本全国を北海道、東北、関東、中部、近畿、中国・四国、九州等の複数ブロックに分けて、技術力が高い回収業者を選定し、そこで、小型風車製作に必要なHVユニットを回収する実証試験を行った。

試験には、連携法人であるトヨタ自動車（株）関連会社の自動車リサイクル研究所が作成した「回収マニュアル」を利用した。

選定した各ブロックの回収業者4社と回収請負契約を締結した。4社にて合計16台の回収試験を回収マニュアルに沿って実施し、同時に回収したユニットの良品チェックも行った。良品確認後は指定した梱包を行った。

梱包されたHVユニットは、連携法人である豊通リサイク（株）へ運送され、風車向け仕様に合うように加工・組み立てした後に作動チェックを行う事による性能試験を行った。最終的なリユースの歩留まり、経済性を評価した。

このほか、プリウスの販売実績が多い米国及び英国で国内と同じ回収スキームを将来的に構築する可能性を視野に入れ、回収マニュアルの英訳を行った。

2. リユースユニット及び車載部品を最大限使用したコストパフォーマンスの高い純国産小型風力発電システムの仕様作り

回収したユニットの内、車輻制御ユニットについて、制御の仕組みを自動車運転から風車発電用にリユースするための仕様作り（ユニットとしてリユースできる仕組み作り）を製造元であるトヨタ自動車（株）関連会社の（株）トヨタタ

ービンアンドシステムに委託し行った。風車がその風速に対して最大の発電が出来る回転数に制御できるよう、測定した風速計からの信号を回収ユニットに通信し、モーター、バッテリーが必要に応じて作動する仕様作りを行った。

そのほか、(株)ジェイテクトに委託して、三重県青山高原設置済みのプロト機を実測し、風速に合わせた風車の最適回転数を決定するアルゴリズムを開発、車載用に製造された制御盤を風車用に再設計し風車全体の起動、停止、待機を含めた全体制御ができる仕組み作りを構築した。この仕組みを検証するために、過去に得られた風速データと風車回転数との関係性についてモデリングを行い、シミュレーションを可能とし、その結果をもとに実測と同じ精度で制御アルゴリズムが開発できる環境を整えた。

豊精密工業(株)に委託し、車載用ディファレンシャルギア(以下デフ)を風車用増速機に転用し、風車回転軸から動力が確実にHVユニットに伝達されて効率的に発電機が回転する仕様作りを行った。さらに最重要部である風車軸の強度パイロット試験も行った。

なお、当初は豊精密製(株)のコースター・デフの使用を予定していたが、強度、耐久性の観点から日野自動車(株)のトラック用デフへと変更し、デフとHVユニットの結合にも車載CVJを転用する事からその製造元である(株)ジェイテクトにて必要な設計を行った。さらに車載部品であるブレーキやプロペラシャフト(以下ペラまたはペラシャフト)についても同様に風車仕様に変更し、利用を可能とした。これら全ての車載用部品について風車仕様として利用する際の信頼性評価を行った。

そのほか、風車全体システム設計に対する信頼性評価も行った。

3. HVユニットを利用した小型風力発電事業の経済性評価

上記実証をもとにして、小型風力発電事業の経済性評価を実施した。評価は、発電した電力を売電するケース(オングリッド)と事業者により自家消費するケース(オフグリッド)をそれぞれ行った。

オングリッドの場合、現在、普及が加速している「小型風車」に対するFIT価格(55円/kWh)にて売電する事を前提として、今回の実証事業を通じて得られた結果をベースに発電事業を行った場合の経済性評価を行った。

オフグリッドの場合、豊田通商(株)の特定の事業会社をモデルケースとして、今回実証する小型風力発電を導入した時の費用対効果をシミュレーションする事により経済性評価を行った。実際に風車を導入した際の投資コストを何年で回収できるかを評価基準とした。

4. 小型風力発電システムが環境へ及ぼす影響評価（騒音等の評価）

プロト機的设计変更による運転中断により実測での評価は出来なかったが、同一タイプの風車の試験データから、考察・評価を行った。

III. HVユニットを回収し、回収部品の性能評価するスキーム

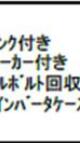
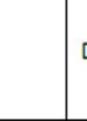
III-1. HVユニットを回収するスキームの確立

1. HVユニット 回収マニュアル

(1) 部品回収リスト

回収部品（全15部品）のリストを図表 1にて示す。

図表 1 HV部品ユニット回収リスト

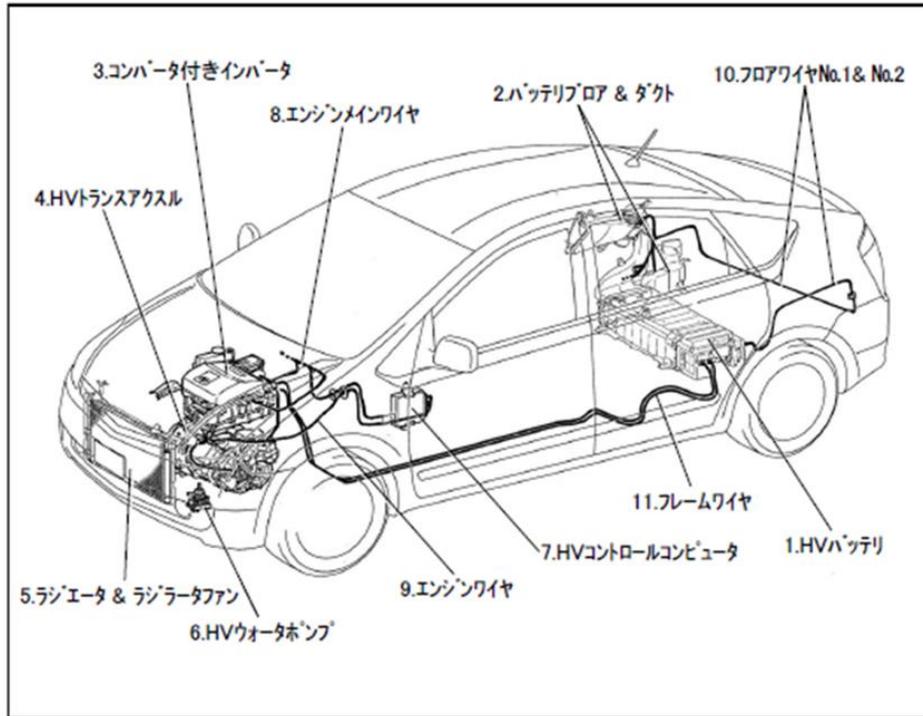
NO.	部品名称	取り付け部位	備考	単体写真	確認
1	HVバッテリーAssy	ラックージルム	・保護用にバッテリーキャリアパネルNo.6 取り付け		<input type="checkbox"/>
2	サービス プラグクリップ	HVバッテリー			<input type="checkbox"/>
3	ブロワファン	ラックージルム (右クォーター)			<input type="checkbox"/>
4	吸気ダクト	ラックージルム (右クォーター)	・構成は2部品		<input type="checkbox"/>
5	排気ダクト	ラックージルム (右クォーター)	・構成は2部品 ・1つはブロワモータコントロール付き		<input type="checkbox"/>
6	インバータAssy	エンジンルーム 左側	・リザーバタンク付き ・サーキットブレーカー付き ・高圧ケーブルホルド回収 ・保護用にインバータケース取り付け		<input type="checkbox"/>
7	HVトランス アクスルAssy	エンジンルーム 左側	・ジェネレータケーブル付き ・モーターケーブル付き ・ジェネレータレゾルバセンサ付き ・モータレゾルバセンサ付き ・モータ温度センサNo.1/No.2付き		<input type="checkbox"/>
8	エンジンマウンティング インシュレータ ブラケット	エンジンルーム 左側			<input type="checkbox"/>
9	ラジエータAssy	エンジンルーム 前側	・ファン接続付き ・切断可		<input type="checkbox"/>

NO.	部品名称	取り付け部位	備考	単体写真	確認
10	HV ウォーターポンプ	エンジンルーム 左側	・ポンプコネクタ付き ・切断可		<input type="checkbox"/>
11	HVコントロール コンピュータ	車室内P席側	・エンジンコントロールコンピュータとは 分離して回収 ・インバータの接続コネクタ:1個付き		<input type="checkbox"/>
12	エンジンルーム メインワイヤー	車室内～ エンジンルーム	・インバータ外接続コネクタ:3個付き ・インバータ内接続コネクタ:3個付き ・サーキットブレーカーコネクタ:1個付き ・HVコントロールコンピュータコネクタ:2個付き ・通信シールドアース線:1個付き		<input type="checkbox"/>
13	エンジンワイヤー	車室内～ エンジンルーム	・ジェネレーターズルバコネクタ付き ・モータズルバコネクタ付き ・モータ温度センサNo.1/No.2 コネクタ付き ・HVコントロールコンピュータコネクタ:1個付き ・シフトコントロールアクチュエータコネクタ:1個付き		<input type="checkbox"/>
14	フロアワイヤー～ フロアワイヤーNo.2	車室内～ ラゲージルーム	・HVバッテリーコンピュータ接続コネクタ: 3個付き ・プロモータコントロールコネクタ:1個付き ・プロモータコネクタ:1個付き ・プロモータリレー:1個付き		<input type="checkbox"/>
15	フレームワイヤー	下廻り	・高圧配線のみ回収 (樹脂プロテクタ取り外し)		<input type="checkbox"/>

(2) 回収部品配置図

回収部品の車載時の配置を図表 2にて示す。

図表 2 HVユニット回収部品配置図



(3) HVシステム回収前点検

回収前に回収する車両に対して行う点検を定めている。マスターウォーニングランプまたはチェックエンジンウォーニングランプが点灯している車両からは部品回収を行わないように定めている(図表 3)。

図表 3 HVユニット回収前点検

1. マスターウォーニングランプまたはチェックエンジンウォーニングランプが点灯している車両から部品回収は行わない。

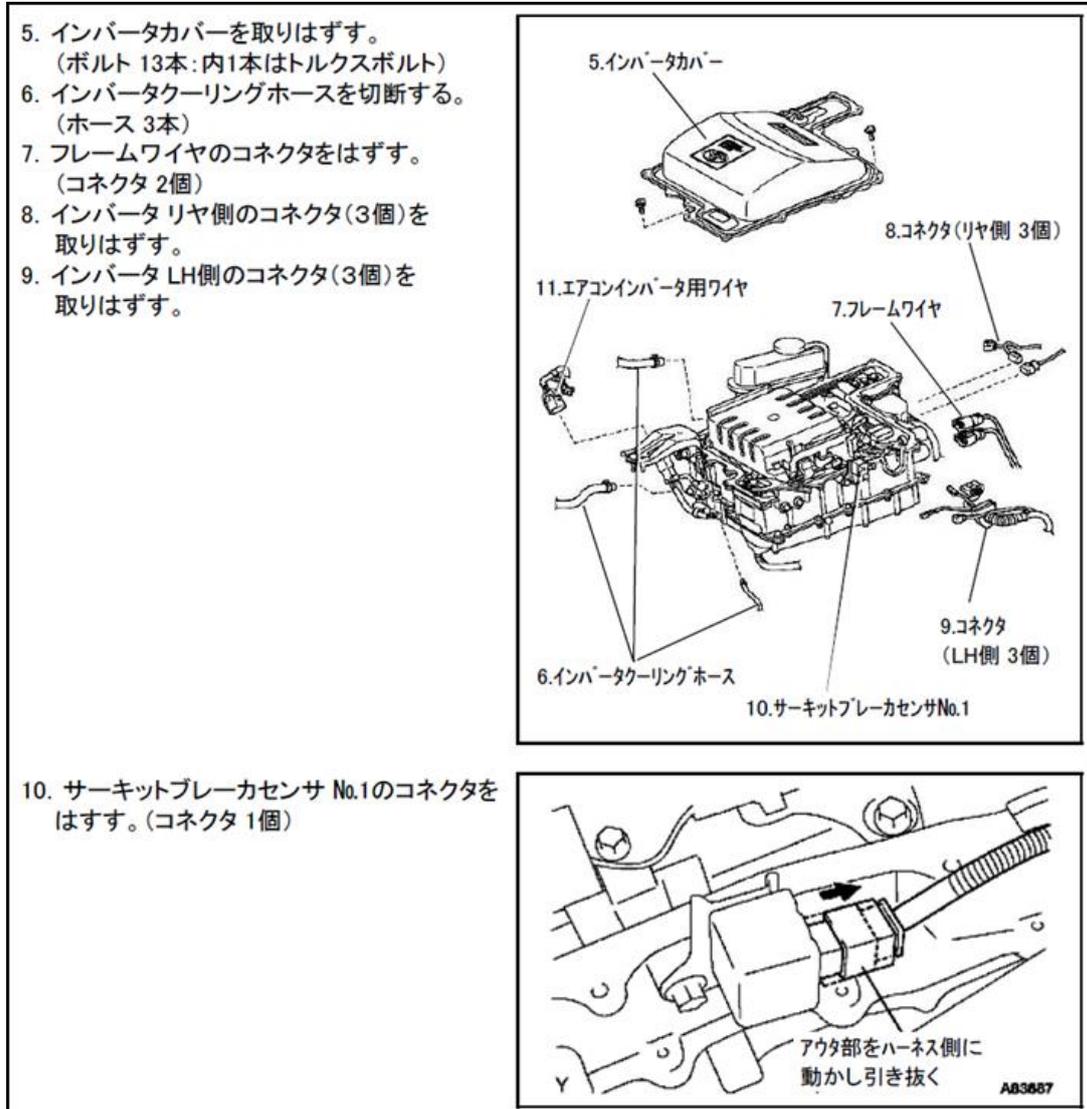
・メータ内の「マスターウォーニングランプ」および「チェックエンジンウォーニングランプ」が、エンジン(パワー)スイッチをONIにしたとき点灯し、READY状態にしたとき消灯することを確認する。

チェックエンジンウォーニングランプ マスターウォーニングランプ

(4) HVユニット取り外し作業要領

合計15部品・11工程にわたって取り外し作業を図示している。以下図表 4 はインバータを取り外す作業を例示している。

図表 4 取り外し作業要領(インバータ取り外し)



2. 回収マニュアルに沿った実証試験結果

(1) 回収時間

契約をした回収業者4社について、回収時間を測定し、作業効率を確認した(図表 5)。それぞれ調査時状況が異なる(図表 5備考)が、前処理済み(ドアやシート、主要な外板部品を取り外す)の場合、実計測の回収時間は115分、94分、121分、140分で有り(図表 6)、概ね100分前後となると考えられる。

自動車リサイクル研究所にて理論的作業時間(作業として成り立つ最小の作業単位、移動時間、余裕時間などは入っていない。)も算出したが、実際の解体作業方法は、各社各人にて異なるのが実情であった。これは、実際の解体作業は他中古部品を回収しながらの作業になるからである。

但し、本実証事業開始前の平成27年1月に回収マニュアル作成作りの為、小林商店にてデモ解体を実施した時は1台の解体に1日強の時間を要していた。それを鑑みると、回収マニュアルによる研修を繰り返し、また、浸透させることで、回収時間の短縮が確認され、ガソリン車並みの時間にて回収が可能になる事が確認された。

図表 5 HVユニット回収時間調査

No.	管理No.	回収業者	回収立ち合い日	回収時間(分)												合計	備考				
				1	2			3	4	5		6	7	8	9			10	11	12	
				HVユニット ASBY	エンジン ASBY	トランスミッション ASBY	ブレーキ ASBY	サスペンション ASBY	ステアリング ASBY	HVユニット ASBY	エンジン ASBY	トランスミッション ASBY	ブレーキ ASBY	サスペンション ASBY	ステアリング ASBY	HVユニット ASBY	エンジン ASBY	トランスミッション ASBY	ブレーキ ASBY	サスペンション ASBY	ステアリング ASBY
1号 経済性評価				9.4	1.1			0.5	15.9	1.9	0.5	17.0	3.4	1.9	4.5	3.4		1.0	73.1	作業作業時間を積み上げた時間。実際は1.5~2.0倍くらいこの予想。	
1	160A DS-1	大晃商事	2016/9/27	5.0				12.0	36.0	6.0		1.0	14.0	11.0		20.0	10.0		115.0	前見地済	
2	160A IS-2	石上車輛	2016/10/25	4.0	3.0			7.0	37.0	1.0	5.0	4.0	5.0	4.0		14.0	10.0		94.0	前見地済	
3	160A IS-3	石上車輛	2016/10/25	5.0	3.0			10.0	42.0	5.0	1.0	4.0	5.0	24.0		18.0	4.0		121.0	前見地していない状態から、部品取りしながらの作業	
4	160A KS-2	小林商店	2016/11/14	14.0	5.0			22.0	33.0	1.0	4.0	3.0		18.0	3.0				140.0	前見地済/説明しながらの作業	

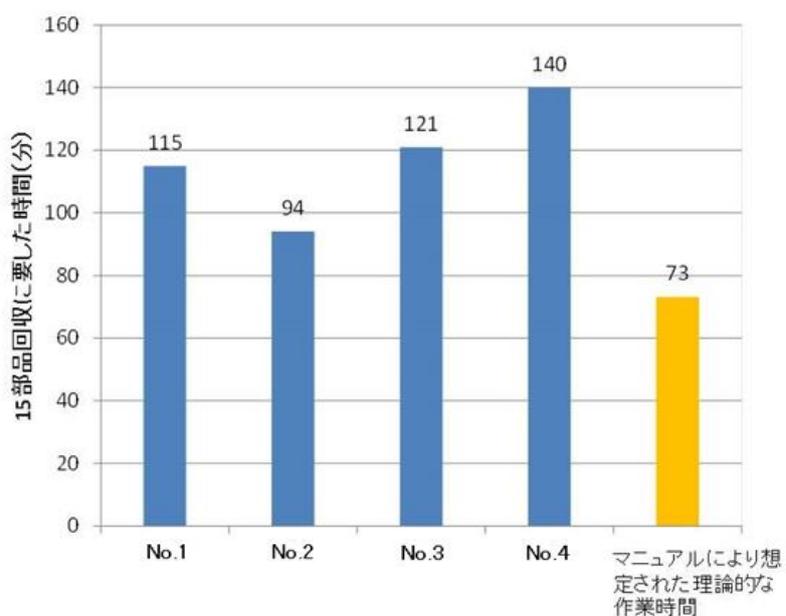
【No. 1】 回収業者：株式会社大晃商事 実施日：2016/9/27

【No. 2】 回収業者：石上車輛株式会社 実施日：2016/10/25

【No. 3】 回収業者：石上車輛株式会社 実施日：2016/10/25

【No. 4】 回収業者：小林商店 実施日：2016/11/14

図表 6 HVユニット回収時間



(2) 回収マニュアルに基づく回収作業の様子

図表 7が、石上車輛（株）にて回収作業(実施日：2016/10/25)をしている様子であり、HVモーターの切り離し作業中である。

図表 7 石上車輛（株）での回収作業の様子(写真)



図表 8が、小林商店にて回収作業(実施日：2016/11/24)をしている様子であり、HVバッテリーの取り外し作業中である。

図表 8 小林商店での回収作業の様子(写真)



III-2. 回収した部品に対する性能 (動作)試験結果

1. 回収マニュアルに沿った検品

(1) 検品結果

回収マニュアルに基づき、回収業者4社にて取り外しをされたHVユニットを共同実施者である豊通リサイクル(株)へ輸送、検品をした。各部品に関し、概ね外観による検品では可と判断した。ラジエータに13ユニット検品の内の2ユニットに一部「不可」のものが出た。(図表9)また、一部コネクタやネジについて回収漏れも有り、細部の回収方法は常に回収業者に指導して行く必要がある事が判明した。

図表 11 豊通リサイクル（株）での検品の様子-2(写真)



(3) 豊通リサイクル（株）での性能(動作)試験

回収マニュアルに従って回収されたHVトランスアクスル、インバータ、HVバッテリー、フレームワイヤ 及び 回収したコネクタ(図表 12、図表 13)を利用し新たに作成したハーネスを組み合わせ(図表 14)、性能検査(動作試験)を行った。性能検査(動作試験)では、今回の実証試験用にソフト改造したHV-ECUを利用してトルク指令を出し、想定通りの時間内で起動を開始し、回転数が得られるかどうかを検証した。

図表 12 ハーネスに取り付けられた状態の回収したコネクタ-1(写真)



図表 13 ハーネスに取り付けられた状態の回収したコネクタ-2(写真)



図表 14 性能(動作)試験用に新たに作成したハーネス(写真)



(4) 性能(動作)試験の様子

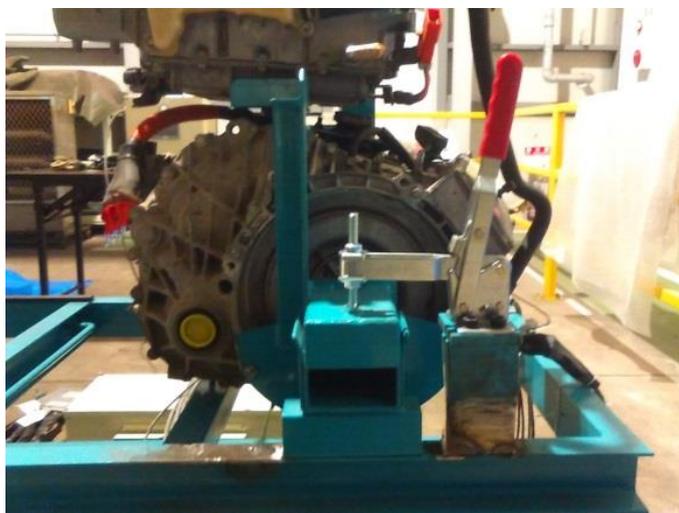
性能(動作)試験用に製作された専用架台(図表 15)に、HVモーター、インバータ、HVバッテリー、フレームワイヤ、新たに作成したハーネスを組み合わせ、動作試験を実施した。

図表 15 性能試験用に製作された専用架台にHVユニットを組み付けた様子(写真)



(株) ジェイテクト製TOYOPUCでトルク指令(測定:6N, 4N)を出すと、バッテリー音、インバータ音に続いて、HVモーターが回転する事が確認された(図表 16)。

図表 16 HVモーターの側面(写真)



簡易検査機を今回の試験用に製作し、最大電流値、最大回転数を計測、記録した(図表 17)。

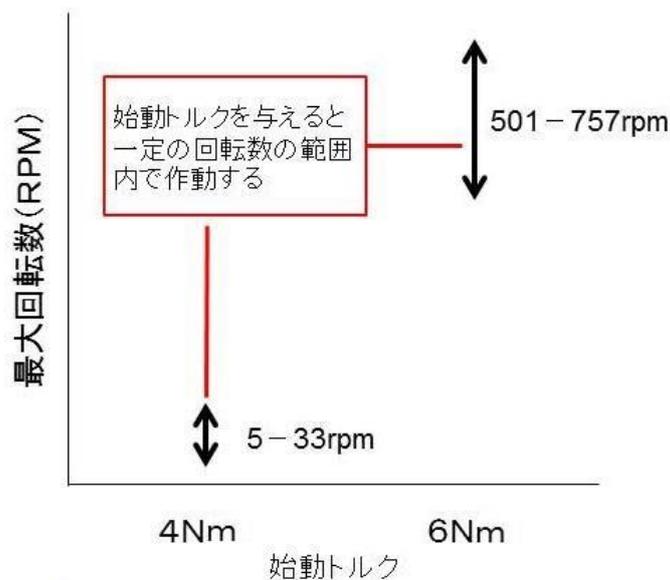
図表 17 簡易検査機の画面(写真)



(5) 性能(動作)試験結果とHVユニットを回収するスキームの実現可能性について

豊通りサイクル(株)にて行った動作試験結果は図表 18, 図表 19の通りである。14ユニット、計100回の性能試験(動作試験)を実施した。HVモーターが作動した際、トルク指令4Nmの際は、5-33rpm、トルク指令6Nmの際は、501-757rpm、と一定の範囲内の最大回転数の結果を得た。この結果を踏まえ、一定の性能のHVユニットを回収するスキームの確立は可能と確認された。

図表 18 豊通りサイクル(株)での性能試験(動作試験)結果



図表 19 豊通リサイクル（株）での性能試験（動作試験）結果詳細（抜粋）

試験No.	被試験ユニット インバータ	被試験ユニット T/A	被試験ユニット バッテリー	始動トルク (Nm)	印加トルク (Nm)	最大電流 (A)	最大回転数 (rpm)
以下11月29日分試験データ							
75	160ADS-1	160AIS-3	"	6 Nm		2.6	649
76	"	"	"	"		3.4	659
77	"	"	"	"		3.8	650
78	"	"	"	4Nm		0.2	25
79	バッテリーケーブル繋ぎ忘れ この時試験装置に「異常あり」は出なかった。						
80	160AIS-3	"	"	6 Nm		3.6	651
81	"	"	"	4 Nm		0.1	17
82	160ADS-4	"	"	6 Nm		3.2	664
83	"	"	"	4 Nm		0.2	21

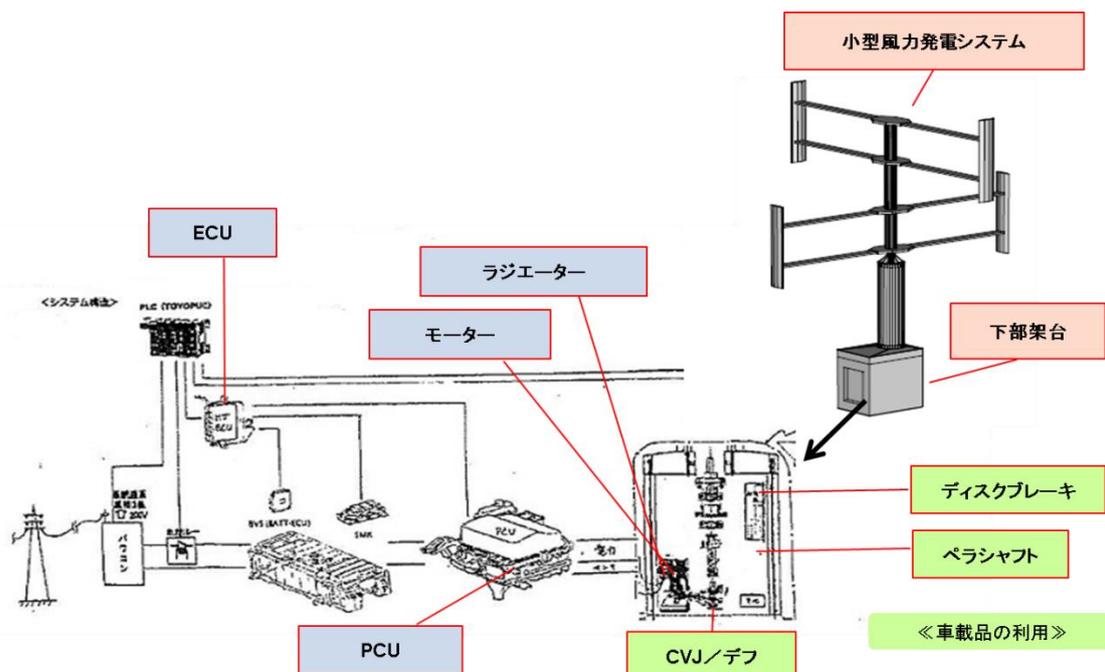
IV. リユースユニット及び車載部品を最大限使用したコストパフォーマンスの高い純国産小型風力発電システムの仕様策定

IV-1. 小型風力発電システムの仕様作成

今回の仕様作成にあたり、基本コンセプトとした事は次の通り(図表 20)。

- ▶ フェールセーフの思想に基づいて安全第一な設計とする
 - ⇒風車が暴走しないように、制御、メカ、両方でブレーキ機能を有する
- ▶ モーターを発電機としてリユースする際に最も発電効率が最も高い仕様にする
 - ⇒出力 2~2.5kW@風速5m/s、定格15kWにて仕様を決定
 - これに伴い翼の形状(NACA0018)、サイズを決定した。
- ▶ HV制御ユニットを発電制御ユニットとして活用し、性能が高いシステムとする
 - ⇒通常風車には装備されていないインバータ機能、バッテリー機能をフル活用
- ▶ 車載用部品を風車として使用する可能性を追求し、コスト低減をする
 - ⇒デフ、CVJ、ペラ、ブレーキ等採用
- ▶ 車載搭載時の環境を再現して、性能を担保する
 - ⇒異常監視システム、冷却システム等もリユースする
- ▶ 中古部品を使用するため保守・メンテ性を良くする
 - ⇒垂直型風車を選択し、部品を下部架台に集結する

図表 20 基本コンセプトに基づいた主要構成部品



上記図表 20の発電システムを実現するためには、回収したHVユニットの改造や、新規部品の作成が必要となる。以下に必要な仕様の概要を示す。

1. 車両制御ユニットの風力発電転用のための仕様作成 (IV-2に対応)

車両制御ユニットはもともと自動車制御用のため、風況に応じた制御を実施するための改造を行う必要がある。風況に応じた制御は(株)ジェイテクト製TOYOPUC(以下TOYOPUC)にプログラムされるため、車両制御ユニットを中継して発電機に情報を受け渡しできるようにソフトウェアの書き換えを実施した。

2. 風車回転速度の最適化アルゴリズム開発 (IV-3に対応)

風車には、風速に応じて最大に発電する回転数特性がある。風速に応じた最適な制御を行うアルゴリズムの開発を実施した。

3. HVモーターを風車仕様でリユースした際の性能と信頼性評価 (IV-4に対応)

HVモーターの性能を最大限発揮するための仕様作成、また、モーターを構成する各部品が風車仕様とした場合の耐久性・寿命について評価を実施。問題がある場合は、その対策まで検討した。

4. 車載用デフ等の転用仕様作成 (IV-5に対応)

風車の回転動力を発電機に伝えるための駆動系を、車載用デフ等の自動車部品を転用することで製造した。

5. 車載用ディスクブレーキの風車仕様への改造 (IV-6に対応)

中型トラック用のエアードISKブレーキを風車仕様に利用できるように改造を検討。付属のエアシステムについても設計し、実証試験を実施した。

6. 回収した冷却システムの風車でのリユース実証試験 (IV-7に対応)

回収したHVユニットの性能を担保するために、車載で使われている各冷却システムについても回収して、リユースのための性能試験を行った。

7. 風車全体システム設計に対する信頼性評価 (IV-8に対応)

各ユニットの信頼性評価を確認するために、全体システムに対する構造解析を行って、各ユニットを評価した荷重条件(入力条件)の妥当性を確認した。

8. 小型風力発電システムの環境影響評価試験(騒音試験) (IV-9に対応)

プロト機を参考に実際の風車から起きる騒音を実測し、環境への影響評価を実施した。

IV-2. 車両制御ユニットの風力発電転用のための仕様作成

回収したユニットのうち車両制御ユニットについて、制御の仕組みを自動車運転から風車発電用に転用するための仕様作りを実施した。また仕様に沿って確実に作動するかどうかの性能試験を行った。

車両制御ユニットは本来、自動車ドライバーのアクセル操作を適切な信号に変換し、モーター回転速度の制御（加減速）を行う。一方で本実証が目指すシステムにおいては、風況に応じて最適発電を実施するよう、風速計の信号をもとに風車の回転速度制御を行う。したがって入力信号に応じてモーター制御を行う車両制御ユニットのソフトウェアを、本実証の目的に合わせて改造する必要がある。

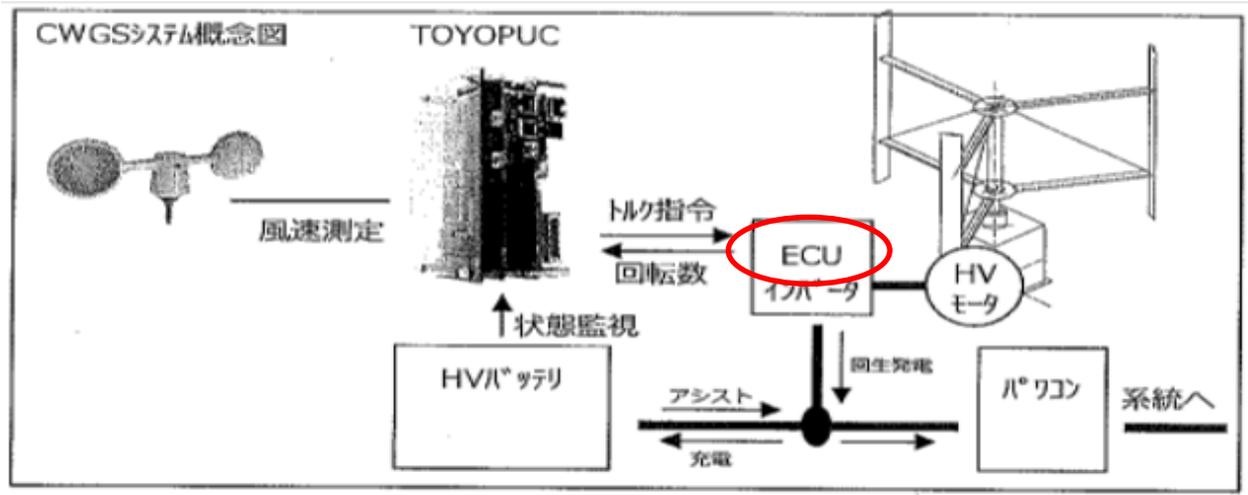
図表 21 本実施項目における略語の定義

名称	定義
プリウス	トヨタプリウスHNW20の略称
TOYOPUC	上位制御装置TOYOPUC-PLCの略称。PLCはプログラマティック・ロジック・コントローラーの略で、オンシステムでは制御内容をプログラミングしておくことで風況に応じた制御を行う
HV-CONTROL	HV-ECUとMG-ECUを内蔵した制御装置
HV-ECU	HVの各モジュールの制御を行う電子コントローラユニット
MG-ECU	PCU（走行用インバータ）の制御、センサ情報を中継する電子コントローラユニット
PCU	プリウスの走行用インバータ
T/A	プリウスのトランスアクセル
MG2	T/A内のモーターの略称、本風力発電システムの発電システムに利用
MG1	T/A内の発電機の略称
SMR	システム・メイン・リレーの略称
DIAG	DiAgnosticの頭文字で、自動車の自己診断機能

1. 実施項目の詳細

本実施項目の対象の詳細を以下の図表 22に示す。赤で示したECU（車両制御ユニット）が本実施項目での改造対象にあたる。HV制御システムはもともと入力信号（アクセルの踏込情報など）に応じて自動車の各モジュール（モーターなど）を制御するユニットである。本システムにおいてはTOYOPUCから与えられる風況に応じた制御信号（トルク指令）を、発電機に中継する役割をになう。さらに、車両制御の一部であるバッテリーやインバータの状態監視機能についても、風車運転時でそのまま利用できるようにする。

図表 22 HV制御システムと風車制御システム



HV制御システムは、HV-ECU（HVの各モジュールの制御を行う電子コントローラユニット）とインバータ制御・センサ情報を中継する電子コントローラユニット）の2パーツからなる。HV-ECUはTOYOPUCの制御指令を受けとり、指令内容をインバータに渡す。インバータはそれに基づきHVモーターの制御を行う。インバータ以降の機能は既存のものが活用できるため、HV-ECUのソフトウェアのみの改造を実施した。

2. ソフトの要求仕様策定

HV制御システムが満たすべき機能と、その概要を以下の図表 23に示す。No.1（TOYOPUCとの連携）においては①トルク制御指令、FB信号中継、②SMR指令受付と駆動、③T/A、PCU、DIAG情報取得の3つの機能が必要であり、HV-ECUの改造により対応した。No.2（MG-ECU連系）、No.3（DIAG機能）については既存のMG-ECU機能を活用可能なため、対応する改造は実施していない。以下に必要な機能についての詳細を記す。

図表 23 HV制御システムの必要機能一覧

No.	機能		概要	
1	TOYOPUC 連携 I/F	1-1	トルク制御指令 (SV)、FB 信号 (PV) 中継	TOYOPUC から CAN 経由で MG2 のトルク指令を受け取る。 受け取ったトルク指令を MG-ECU に渡す。 ※MG2 を実際に制御するのは MG-ECU。 MG2 の回転数計測値 (PV) を MG-ECU 経由で受取り TOYOPUC へ CAN 経由で渡す。
		1-2	SMR 指令受付と駆動	TOYOPUC から CAN 経由で SMR の制御指令を受け取り SMR 駆動。
		1-3	T/A、PCU、DIAG 情報	T/A、PCU の状態監視用に温度、電流、電圧情報を TOYOPUC に CAN 経由で渡す。 <ul style="list-style-type: none"> ・安全プラグ状態 ・MG2 回転数 ・MG2 モータ温度 ・インバータ温度 ・昇圧コンバータ温度 ・昇圧コンバータ電圧 <ul style="list-style-type: none"> ・PCU 異常状態 ・HV-ECU 異常状態
2	MG-ECU 連携 I/F	2-1	モータ・発電機・インバータ制御	HV-ECU の既存機能を流用
3	DIAG 機能	3-1	モータ・発電機・インバータのダイアグ監視	HV-ECU の既存機能を流用

(1) トルク制御指令、FB信号中継

TOYOPUC (CAN I/F経由) から通知されたHVモーター制御のためのトルク指令値をMG-ECUに転送する。転送指令受付確認のフィードバックとして指令値をTOYOPUCへ伝送する。制御状態のフィードバック値として、HVモーター回転数をTOYOPUCへ伝送する。制御周期は、既存のベースプログラムの制御周期が8m/secのため、そのまま採用した。

(2) SMR指令受付と駆動

TOYOPUC (CAN I/F経由) よりバッテリーとHVモーターの連携を制御するSMRに指令を送る。指令受付確認のフィードバックとして指令値をTOYOPUCへ伝送する。指令値をSMR駆動I/Fへ転送し、SMRを駆動する。

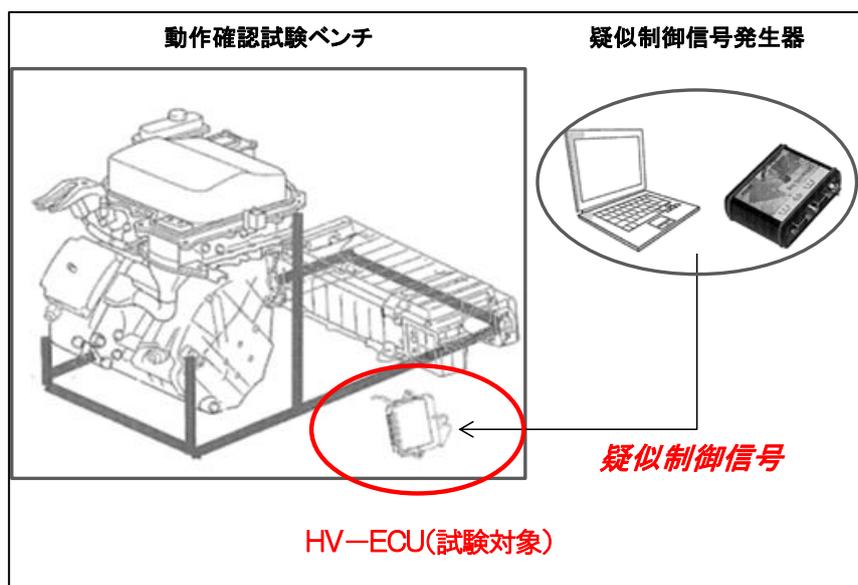
(3) T/A、PCU、DIAG情報

TOYOPUCへ装置安全確認用の情報を渡す。取り扱う情報は“安全プラグの状態”、“HVモーター温度”、“インバータ温度”、“昇圧コンバータ温度”、“昇圧コンバータ電圧”、“PCU異常 (DIAG代表値)”、“HV-ECU異常 (自己状態)”等である。温度など計測応答遅れがあるものは、周期1秒以内で情報を更新する。

3. ソフトの動作確認テスト結果

前節で述べた機能をHV-ECUに実装し、実際の機材を用いて動作確認テストを実施した。テストにはHV-ECUの他、インバータ、HVモーター、バッテリーを組み合わせた試験ベンチ（図表 24）を利用した。制御信号にはTOYOPUCを利用せず、代わりに疑似信号発生装置を利用した。追加したすべての機能についてテストを実施したところ、良好な結果を得た。

図表 24 動作確認テスト用の試験ベンチ



図表 25にて今回追加した機能の具体的内容およびその試験結果、判定基準のついて示しており、全ての判定が「良」であった。

図表 25 追加した主要な機能の動作確認事項と試験結果

試験日 2016/6/29

No	試験要領	判定基準	結果	判定
1	安全プラグ状態信号CAN経由確認 ①CAN ID 0x3CA DATA1 b5をモニタ ②安全プラグを抜く b5を確認 ③安全プラグを挿す b5を確認	②、b5=0 ③、b5=1	②=0 ③=1	良
2	MG2回転数 CAN経由確認 ①CAN ID 0x3A DATA2.3をモニタ ②トルク指令試験の要領で力行 ③回転に合わせてモニタ値変化を確認する	回転数とモニタ値を比較する術がないため、回転に合わせて増減する程度の確認とする ※トルク要求試験と同時に実施	①の変化確認	良
3	MG2モータ温度CAN経由確認 T/A運転しない状態で4時間以上放置 ①CAN ID 0x120 DATA1をモニタ ②周囲温度と比較	①-②<±10℃	①=24℃ ②=25℃	良
4	インバータ温度CAN経由確認 T/A運転しない状態で4時間以上放置 ①CAN ID 0x120 DATA2をモニタ ②周囲温度と比較	①-②<±10℃	①=25℃ ②=25℃	良
5	昇圧コンバータ温度CAN経由確認 T/A運転しない状態で4時間以上放置 ①CAN ID 0x120 DATA3をモニタ ②周囲温度と比較	①-②<±10℃	①=24℃ ②=25℃	良
6	昇圧コンバータ電圧CAN経由確認 ①SMRをON ②CAN ID 0x3A DATA6(VL)をモニタ ③CAN ID 0x3B DATA4(VB)をモニタ	①-②<±10%	②=191V ③=201V 4.97%	良
7	PCU異常のCAN経由確認 HV-ECU異常のCAN経由確認	省略	省略	省略

4. 検討した本仕様の適用可能性

もともとは自動車用である車両制御ユニットを、風車制御の目的に合わせて改造した。従来プリウスのHVユニットは高度にIT化、暗号化されているため再利用が困難であったが、本実証項目においては、プリウスの製造元であるトヨタ自動車（株）の協力を得ることで、風車発電向けリユースを実現した。

IV-3. 風車回転速度の最適化アルゴリズム開発

風速に合わせた風車回転速度の最適化アルゴリズム開発を実施した。

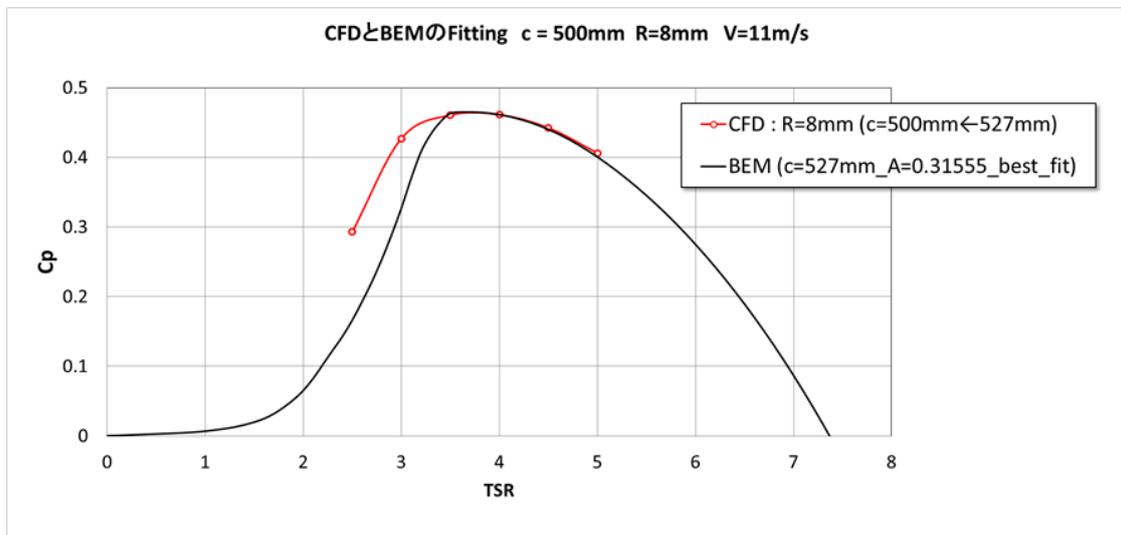
風車は一度回転が停止すると、再度起動させるのに大きなエネルギーが必要となるため、風速が遅い低風速帯では風車が停止しないよう発電機に電流を流す（モー

ターとして利用する) 必要がある。一方風車の損傷防止や発電機の定格といった観点から、風速が早い高風速帯では風車回転数が上がりすぎないようにブレーキを掛ける必要がある。また発電に適した風速帯においても、風速に対して発電効率が最大になる風車回転数（周速比：図表 26）が存在するため、風車の回転数を風速に応じて制御する必要がある。図表 26より、周速比（TSR）3.5～4.0にて最大の出力（ C_p ）が出ることを示している。

当初計画においては三重県青山高原に設置済みのプロト機を実測し、風速に合わせた風車の最適回転速度を決定するアルゴリズムを開発する予定であった。しかし性能と安全性を改善するための風車翼の大幅設計変更により、プロト機の運転を中断したため、風車からの実測データ入手が不可能になった。

風速計は作動しており、風況データの実測は可能であったため、実施計画を変更し、風況に応じて実測と同じ環境を再現するシミュレータを開発することとした。過去の風速と風車回転数の相関をマトラボ（シミュレーションソフト）によりモデル化し、制御アルゴリズムの開発は設計変更後の実機条件を再現したシミュレータ上で実施した。

図表 26 周速比(回転数/風速)



1. 風車発電性能の実機再現性を有するシミュレータ構築

(1) 開発目標

過去の風速と風車回転数の相関をモデル化し、風車発電性能の実機再現性を有するシミュレータを開発した。シミュレータの開発目標は以下の3点である。

- 風速データに応じた発電量の試算が可能であること
- 各種パラメータ（試験条件、補償機ゲイン）が変動した時でも実機を再現可能であること（制御アルゴリズム開発のために必須）

➤ モデル化の精度として、実機との出力誤差が1%以内であること

(2) シミュレータの構築

入力データとして、風速、モーター出力トルクを利用し、風車回転数の実績を再現するシミュレータを開発した。低風速帯、高風速帯では風車の回転数に対して制御がかかるため、比較的安定した発電領域である中風速帯でシミュレーションを行い、風車の定常的な機械/電気特性を同定した。合わせこみを行うパラメータとして、風車の回転モーメント、粘性、クーロン摩擦、風速外乱の時間遅れ成分を利用した。図表 27では、合わせ込みを実際に行った制御ブロック図を示している。

図表 27 風況に応じた風車回転数のシミュレータ

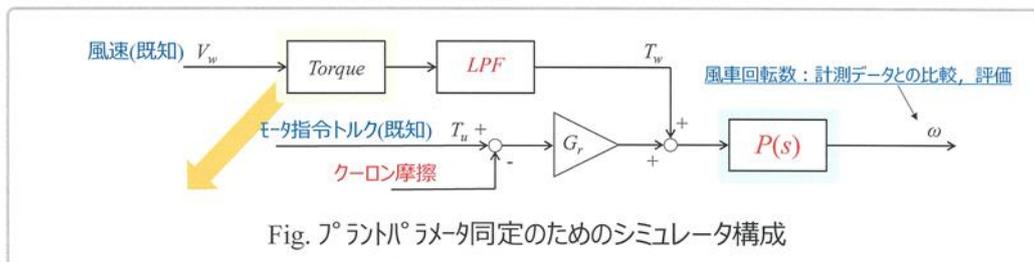


Fig. プラントパラメータ同定のためのシミュレータ構成

✓ 風速外乱演算

風速に応じて風車の回転軸トルクを演算

$$T_w = C_t \frac{1}{2} \rho S R V_w^2 \quad [\text{Nm}]$$

✓ プラントモデル

$$P(s) = \frac{1}{J_w s + D_w}$$

$P(s)$: プラントモデル
ω	: 風車回転角速度...[rad/s]
T_w	: 風速外乱.....[Nm]
T_u	: コントローラ出力トルク.....[Nm]
G_r	: 増速ギア比[Nm]

合わせ込みパラメータ

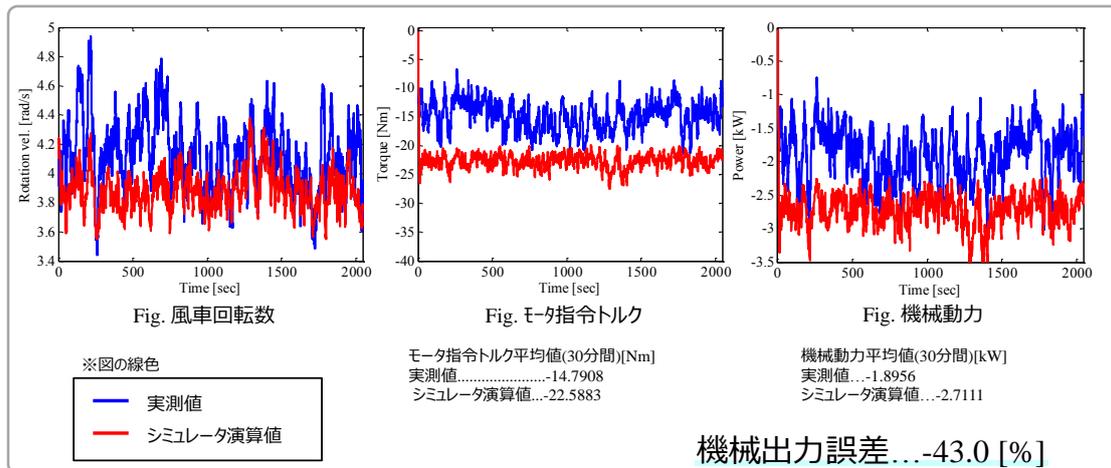
プラントモデルイナーシャ及び粘性項, クーロン摩擦,

風速外乱時間遅れ成分(LPFの折れ点周波数)のチューニング

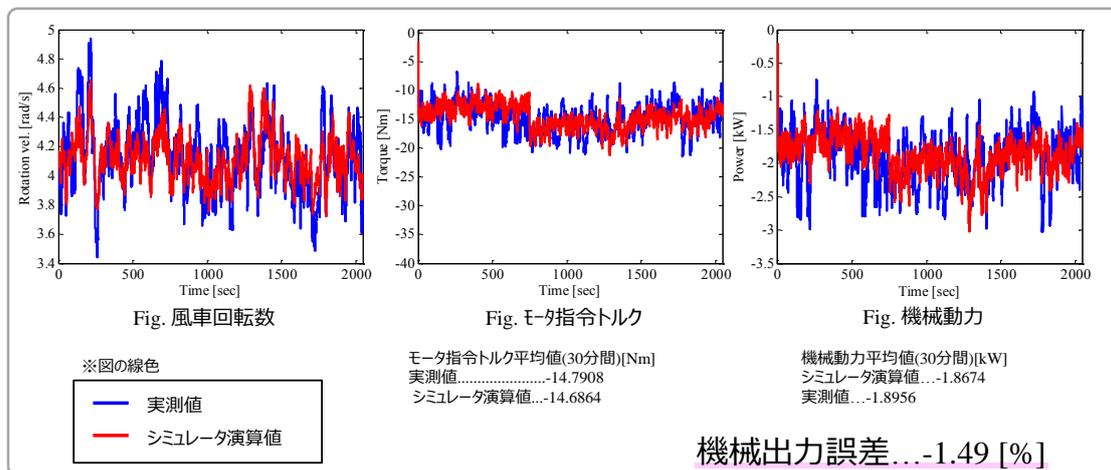
(3) シミュレーション結果

実際に作成したシミュレータによるシミュレーション結果を以下に示す。シミュレーション開始時点(7月実績)では実測値と風車回転数が大きく乖離しており、機械出力の誤差が43%と実用レベルに達していなかった(図表 28)。その後各パラメータの合わせこみを行っていったことで再現精度が向上し、9月実績では機械出力の誤差が1.49%と大きく減少した(図表 29)。

図表 28 実績値とシミュレータ演算値の比較(7月時点)



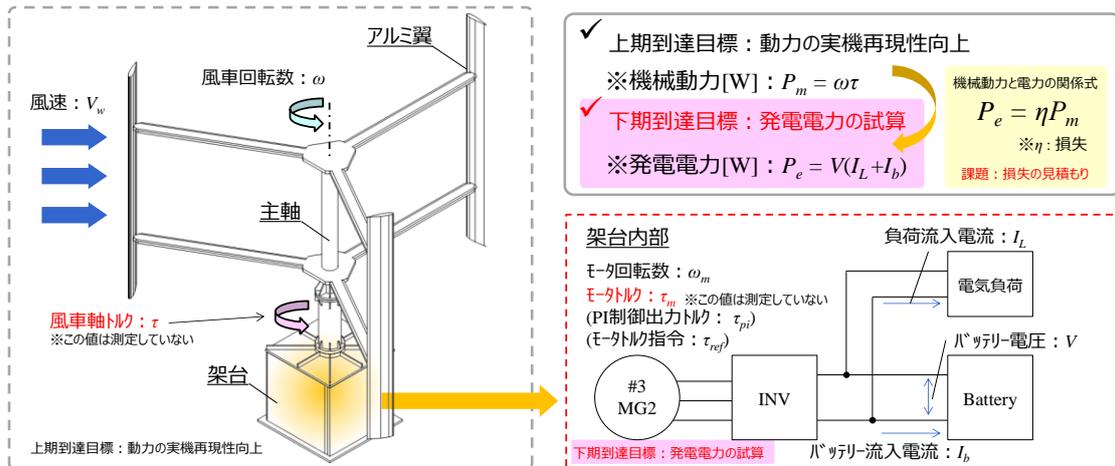
図表 29 実績値とシミュレータ演算値の比較(9月時点)



シミュレータにより算出した機械出力誤差を基に、発電電力量の試算を実施した。実機データとの整合性が取れるように、機械損失の見積もりを行い、機械出力に機械損失をかけることで発電電力量を算出した。

正しい機械損失をきちんと再現できれば、そのデータを同一型式の他の風車にも適用可能であり、風況や制御が変わっても発電電力量は正しく計算されることが判明した。図表 30にて次項に述べる制御アルゴリズム開発へ向けたシミュレーションの仕組みと精度及びその妥当性について説明している。

図表 30 風車回転数と発電電力量の関係



2. 回転数制御アルゴリズムの開発

(1) 開発目標

前節で作成したシミュレータを利用して、回転数制御アルゴリズムの開発を実施した。

一般的な風車の制御は、テーブル方式が用いられている。テーブル制御においては、風速が一定領域ずつに区切られており（テーブル）、それぞれのテーブルに応じた電流を発電機に流して、回転数を制御する。風車の回転速度や発電機のトルクはモニターしておらず、フィードバックも行っていない。

本実証においては、風車の周速比（周速比=風車回転速度/風速）が3.7-4.2（発電効率が最大）になるような制御を適用している（風車の回転数と風況に応じて、最適な回転数を実現されるようモーターにトルクがかかる：図表31(Max_λ)参照）。シミュレータ上で当該制御を適用し、風速に応じた最適な制御アルゴリズムを開発した。

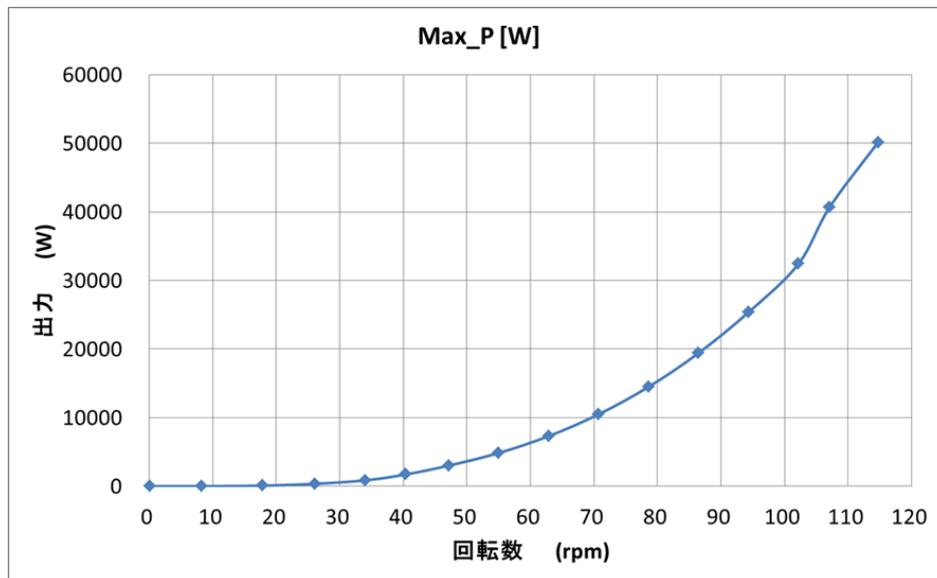
図表 31 制御アルゴリズムが目指す風速と最大回転数及びその際の実出力

Max_N [rpm]	Max_P [W]	Max_λ	V [m/s]
0.1	0	0.3	0
8.3	6	3.9	1
17.8	89	4.2	2
26.1	358	4.1	3
34.0	860	4	4
40.4	1722	3.8	5
47.2	3017	3.7	6
55.0	4852	3.7	7
62.9	7314	3.7	8
70.7	10498	3.7	9
78.6	14499	3.7	10
86.5	19420	3.7	11
94.3	25366	3.7	12
102.2	32418	3.7	13
107.1	40653	3.6	14
114.7	50150	3.6	15

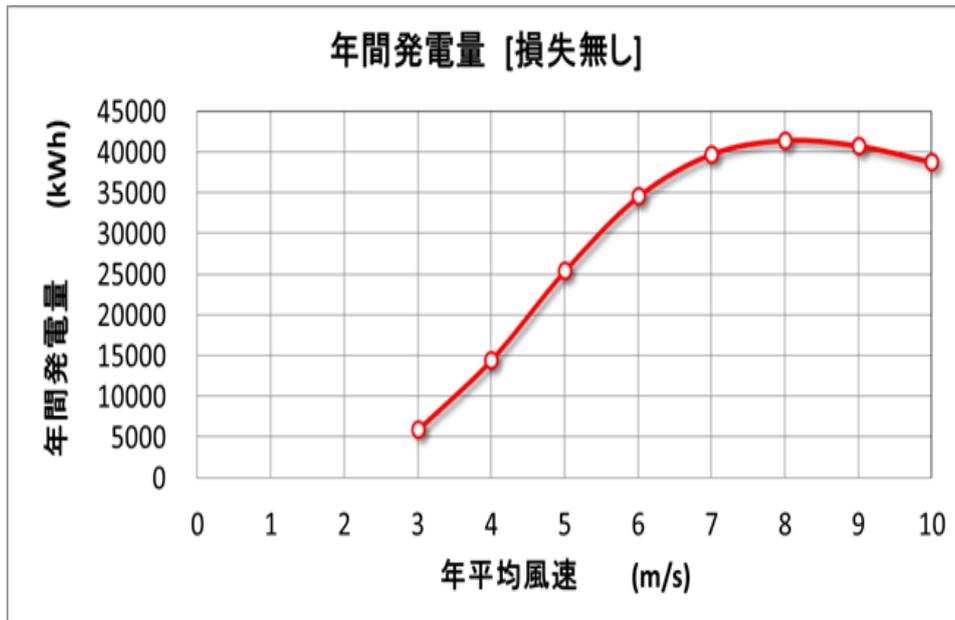
(2) シミュレーションから期待される発電量

開発した制御アルゴリズムを適用した際の、期待される発電量をシミュレーションした。図表 32は回転数と出力、図表 33は、パワーカーブを示す。

図表 32 回転数と出力

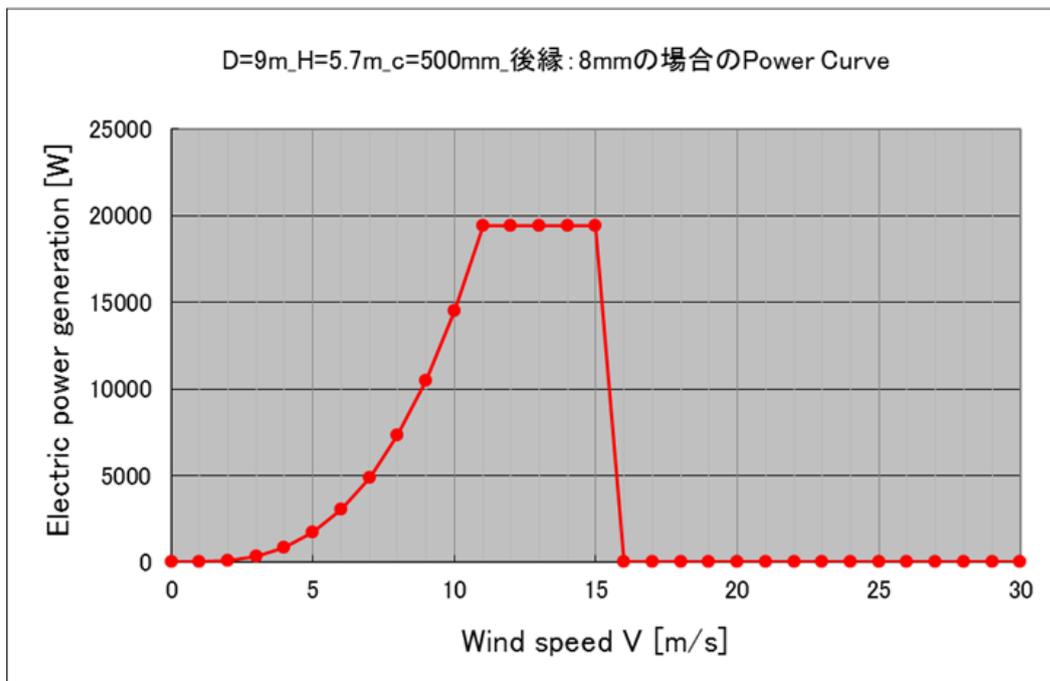


図表 33 シミュレーション上のパワーカーブ



図表 34 において開発した制御アルゴリズム上でのパワーカーブを示す。図表 33 との違いは高風速域で積極的に制御を行っている点である。

図表 34 開発したアルゴリズムでのパワーカーブ



図表 35 では、年間平均風速（レイリー分布）毎で最適に制御を行った場合の年間発電量を示している。図表 33 で示したパワーカーブ上の風速 5m/s

での発電量（25,000kWh）に対して、大幅（約12%）に改善（約28,000kWh）されている事が分かる。

図表 35 制御実施した場合の風速別年間発電量

年平均風速: V(m/s)	年間発電量(kWh) [損失無し]
3	5957
4	14755
5	27978
6	43102
7	56538
8	66091
9	71419
10	73231

3. 検討した本仕様の適用可能性

風速に応じた発電量を再現するシミュレータを開発し、シミュレータ上で風車の最適制御を行うアルゴリズムを開発した。従来方式の風車が利用するテーブル方式制御では、回転数が過剰になる危険性があるため、安全のため回転数を抑えて運用している（回転数を下げるため、発電効率も下がる）。本実証の制御方式では、発電効率が最大になる状態（周速比3.7~4.2）でのオペレーションが可能になるため、従来方式と比較して高い発電効率を実現した。さらに起動を早く、停止を遅くする事による設備利用率も向上している。

またテーブル制御だとダイオードブリッジによる簡易な回路構成で済むが、本制御はより動的でありインバータや高度なセンサ類が必要である。通常風車で同様の構成にすると高額になるが、今回利用するプリウスのHVユニットには、必要な計器類やインバータがすべて備わっている。それらをそのまま活用できるため、経済性の面においても優れている。

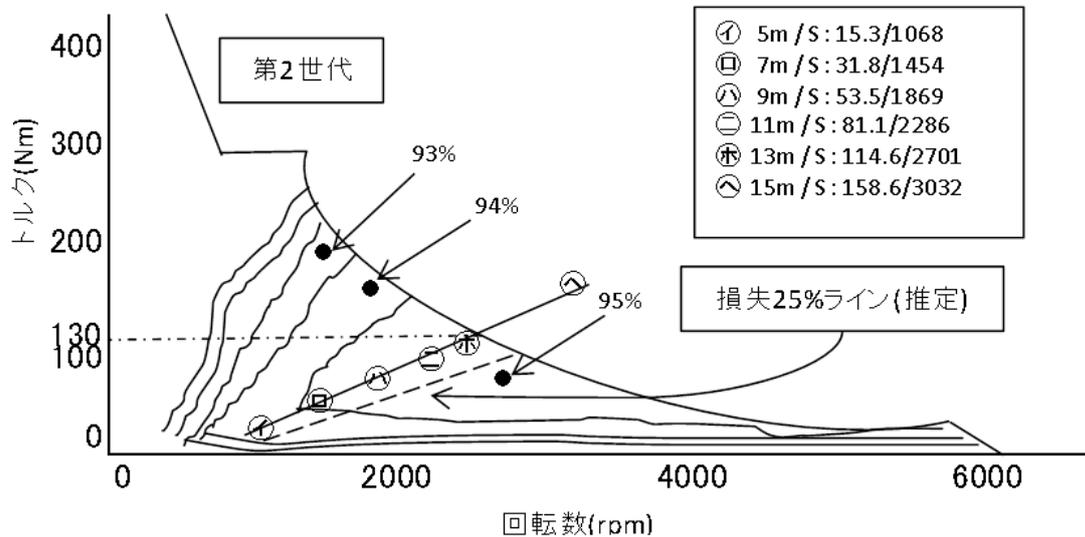
IV-4. HVモーターの風車仕様での性能・信頼性評価

1. 性能評価

HVモーターを発電機として使う場合の性能を評価するためにまずは、モーターの特性について製造元であるトヨタ自動車（株）の協力を得て調査した。

図表 36より今回の実証に使用する2世代プリウスのモーターの出力特性を示す。この表から最も出力が高い95%の回転数とトルクが算出され、回転数では、2000-3000回転、トルクは100-130Nmにて最も効率が良い事が判明する。

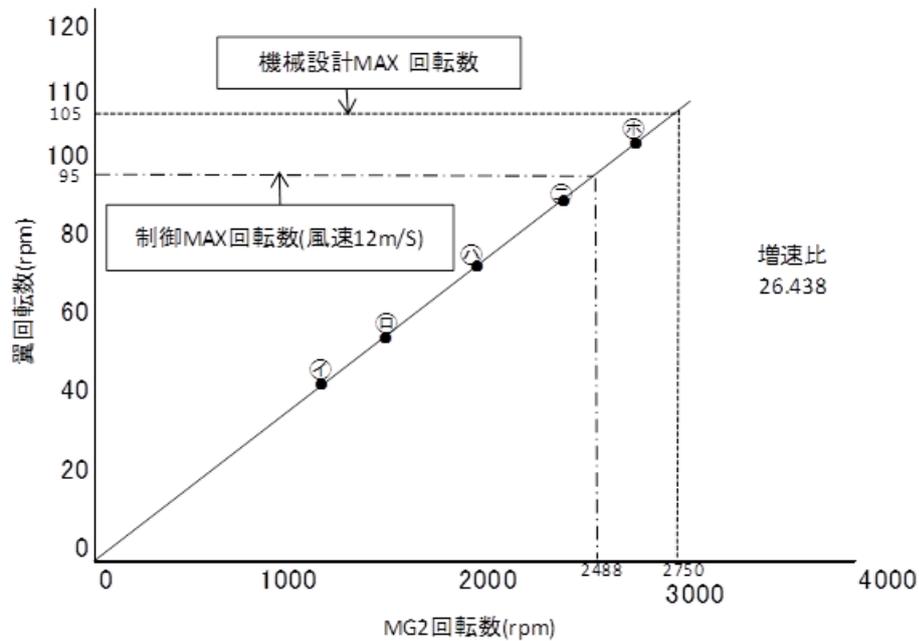
図表 36 モーター回転数とトルク特性



上記回転数を実現するために図表 37より、風車回転数を増速する必要がある事が分かり、最適な増速比は、26.438である事を確認した。

この増速比を実現するために次項(IV-5)で最適な車載用デフ(ディファレンシャルギア)の選択が求められる事になる。これによりモーターを発電機として最大効率で利用する事が可能であると評価できる。

図表 37 モーター回転数と風車翼回転数との関係 (㊦~㊦は図表 36参照)



2. 信頼性評価

車載用部品は自動車での利用を想定した仕様となっており、走行距離60万km程度の耐久性を保証している。一方風力発電に利用する場合常に回転し、発電を行うことになるため、走行時しか利用しない自動車と比較して、より高い耐久性が求められる。例えば、上記60万kmを平均時速40kmで走ったとすると設備利用時間は、1.5万時間となるが、日数にするとわずか625日となり、24時間稼働を前提とする風車では2年に満たない事になる。

このように前提条件の違いから風車部品として利用可能な耐久性を実現するための仕様策定をした。

まずは、製造元であるトヨタ自動車（株）の協力を得て、モーター内の全ての部品について評価をした。

(1) モーター内、各シャフト、チェーン、ギアに風車仕様でかかる負荷を算出

モーター (MG2) ローターシャフト	: 無限寿命
チェーン	: 無限寿命
ファイナルギア	: 無限寿命

結論として、上記ギア系は、全て無限寿命であり問題なし。

(2) モーター内、各ベアリングにかかる負荷

ベアリングの摩耗度による寿命は自動車として走行した距離によっても異なるが、最短（タクシーとして使用され50万km相当走行した場合）は、約1年、一般的な15万km走行した場合でも、約2年となり、ベアリング系は、有限寿命なため比較的早く破損する可能性がある事が判明。そのために、回収後に風車部品として使用する前に、モーター内に4か所着いているベアリング（図表 38）については、特殊熱処理強化品と交換する必要がある事を確認した。

これにより、回収したモーターに、新品以上の耐久性を持たせる事が可能である事が同時に確認された。

図表 38 モーターを分解した内部(左2つのギアの上にベアリングが装着)



(3) モーター内、潤滑の状態

プリウスのモーターは、MG1とMG2といった2モーター構成になっており、車載では、MG1が速度をMG2がトルクを出す役割を果たす。今回は、出力のより高いMG2を発電機として使用し、MG1は利用しない。本来車輻ではこの2つのモーターが常時回転する事により、モーター全体に潤滑が行き届くように設計されているが、MG1が停止したままでも、モーター内全体の潤滑が担保されるように製造元であるトヨタ自動車（株）にて検討がなされた。

その結果、MG1を定期的に動かす案がコスト的にも信頼性でも最善であるとの評価をした。

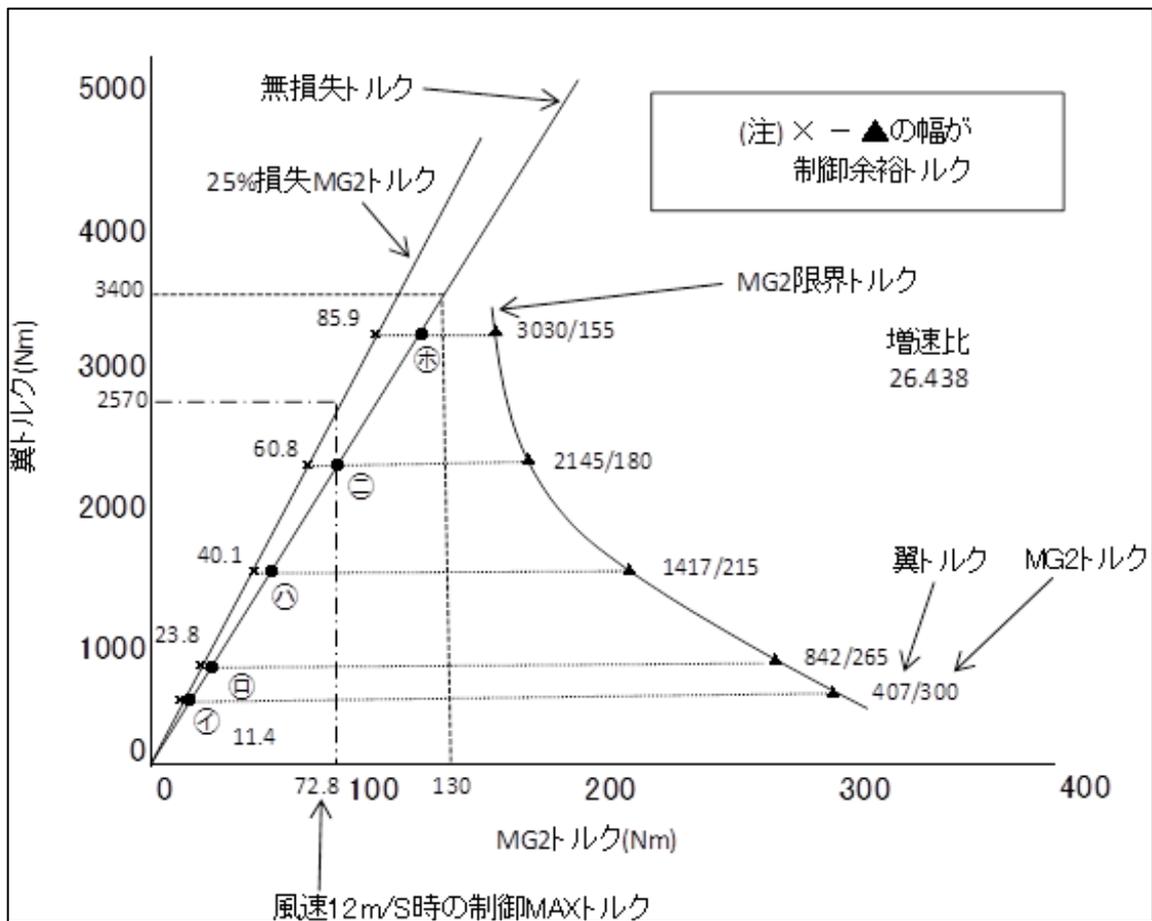
これに伴い、HV-ECUから上記案が実行できる適切な信号が出るようにソフト的な対応を行う事で、モーター内潤滑の問題は解決することが判明した。

(4) モーターへのトルク負荷

モーター全体のトルク負荷について検証した。図表 39にて風車軸から負荷されるトルクに対して、モーター (MG2) の限界トルクと比較して評価すると、十分に制御余裕トルクがある事が確認された。

これにより、風車として使用した場合でもトルク負荷の問題はない事を確認した。

図表 39 モータートルクと風車軸トルクとの相関



3. 検討した本仕様の適応の可能性

当初は、回収品であるが故に年式や走行距離によってHVモーターの劣化状態が異なるため、リユースした際の品質のバラツキが懸念された。

今回の実証により、モーターを構成する部品を無限寿命品と有限寿命品に正しく整理し、有限寿命品には、適切な処理を施し、潤滑状態など車載での使用

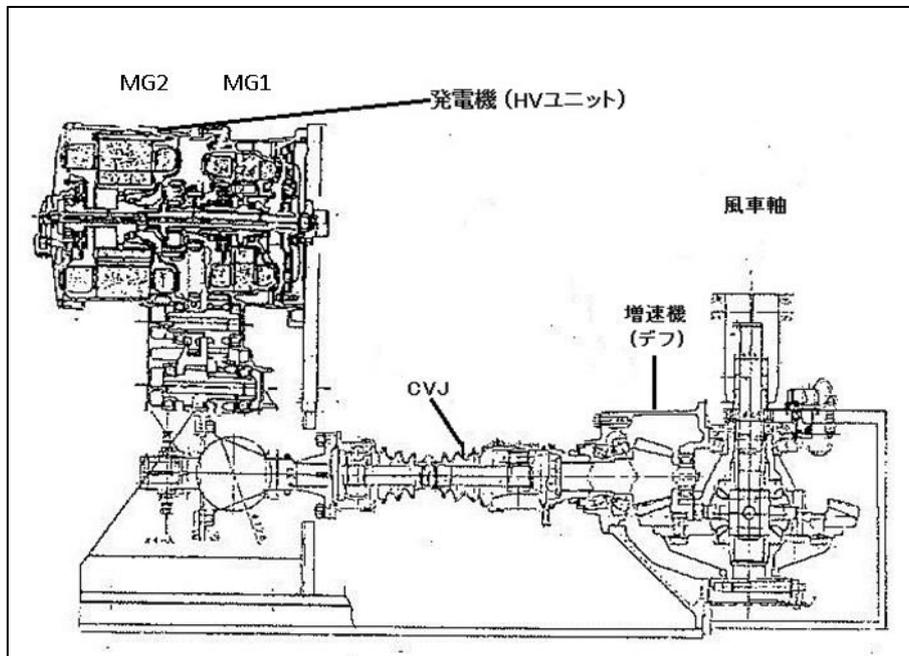
環境を再現すれば、品質が安定した、耐久性も高く、性能の良い、信頼性のある風力発電用発電機として利用できる事が確認された。

IV-5. 車載用デフ等の転用仕様作成

1. 各部品仕様作り

車載用デフ等自動車部品を風車用駆動系ユニットに転用し、風車回転軸から動力が確実にHVユニットに伝達されて効率的に発電機が回転する仕様作りを実施した(図表 40)。

図表 40 駆動系ユニットシステム構成



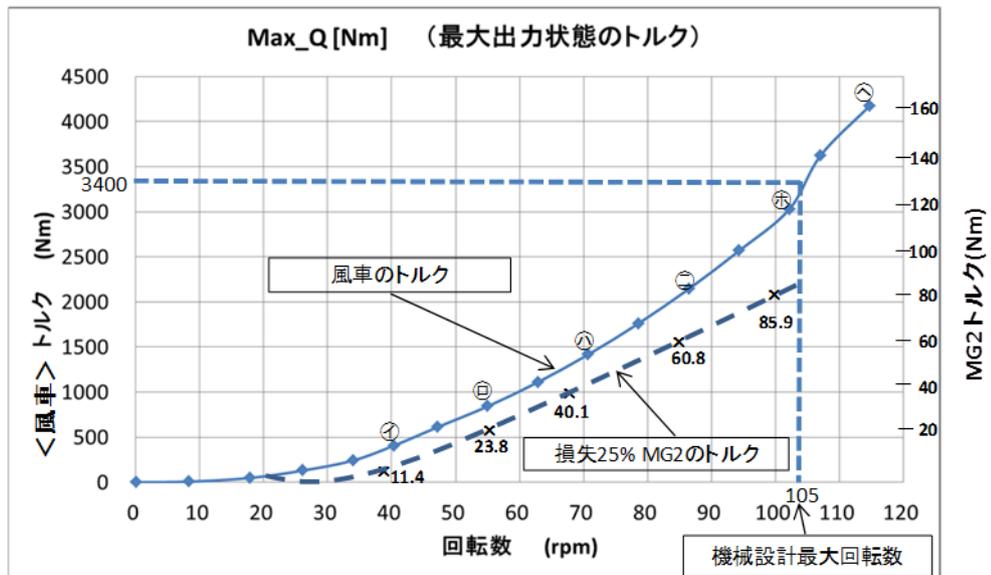
2. 車載用デフ（ディファレンシャルギア）と風車入力軸

前項のモーターでの性能評価の結果として必要な増速比 (26.438) を実現するために、最適なデフの選択を行った。

又、過回転防止のために風車にブレーキがかかると、発電機は慣性で回り続けようとするため、デフ部分に強力なイナーシャトルクがかかる。(図表 41参照)このため、当初はコースター用デフを利用する予定であったが、強度、耐久性の観点から日野自動車(株)のトラック用デフへと変更し、デフの風車仕様への転用のための改造設計を実施した。

これにより、本実証事業の委託先を豊精密工業(株)から(株)ジェイテクトへ変更した。

図表 41 最大出力状態のトルク

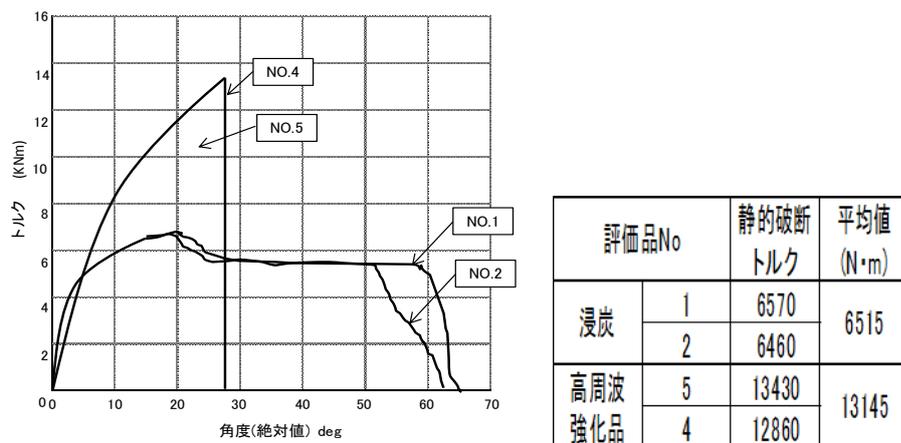


(株) ジェイテクトにて上記トルクを考慮したデフの風車増速機としての使用するために適切な仕様作りを行った。

またデフへの入力軸（図表 40の風車軸）については、適用する材質や表面処理を検討したうえで、新規に製造した。但し、この新規部品もその原材料は、愛知製鋼（株）で車載用シャフト向けに作られた信頼性の高い特殊鋼である。

製造に先立って、図表 42で結果を示した、豊精密工業（株）にて静的ねじり強度のパイロット試験を実施し、入力軸の強度確保を検証した。

図表 42 入力軸材料別の静的ねじり強度試験



図表 42で示すパイロット試験の結果より、高周波強化品（静的破断トルク

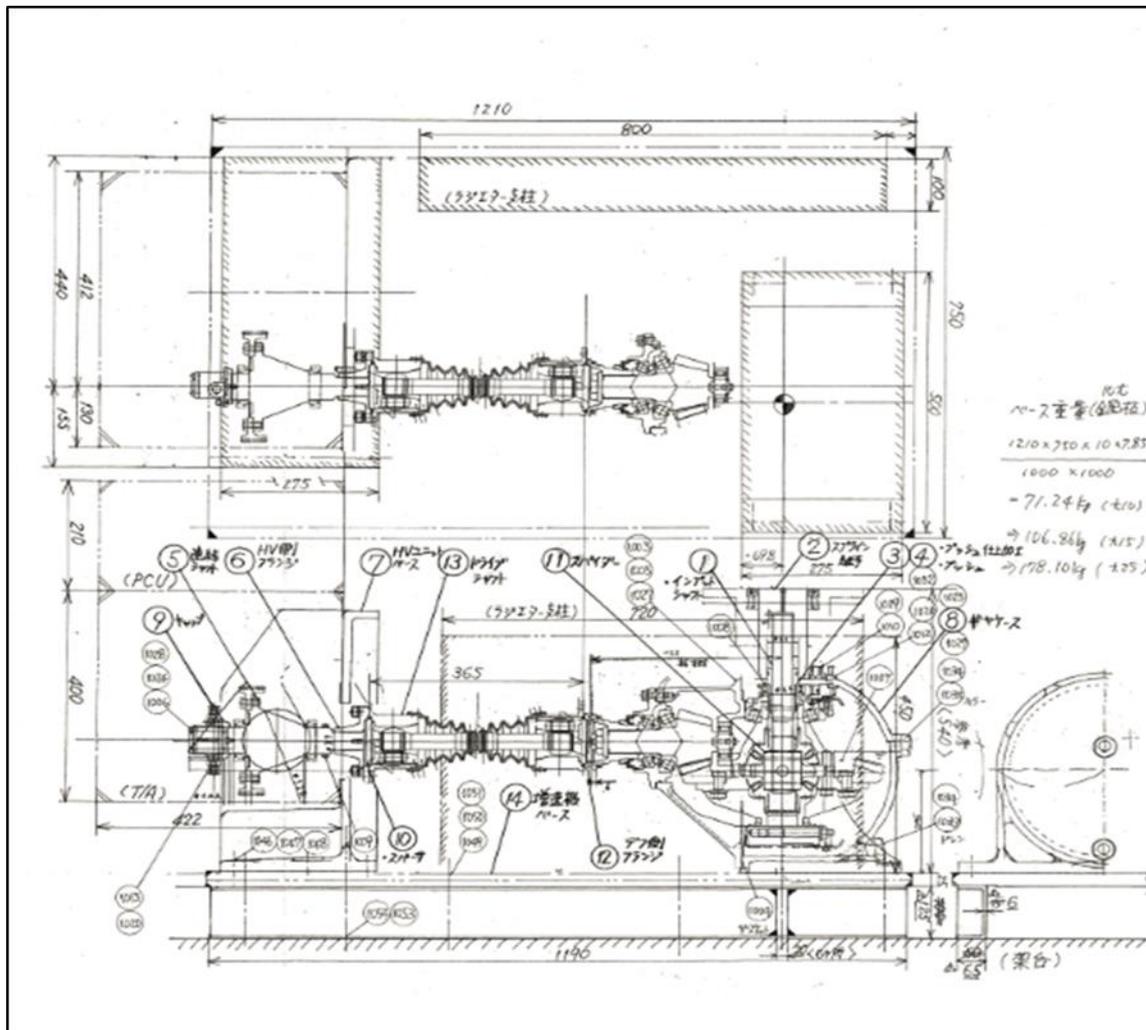
平均13,145Nm)を材料として使用すれば、図表 41で示した最大トルク (3400Nm)の約4倍の強度がある事が確認され、風車軸として十分な品質であると判断した。

3. 高速ジョイント (CVJ)

通常デフのドライシャフト側にある車載用CVJをデフのパラシャフト側に結合させて、風車軸から増速された駆動力をHVモーターへ伝達する仕組み作りを行った。(株)ジェイテクトの既成部品であるクラウンのCVJを一部仕様変更して、風車部品として機能するように設計を行った。

下の図表 43が実際に成果物として(株)ジェイテクトで作成された仕様変更した後のデフとCVJの設計図である。

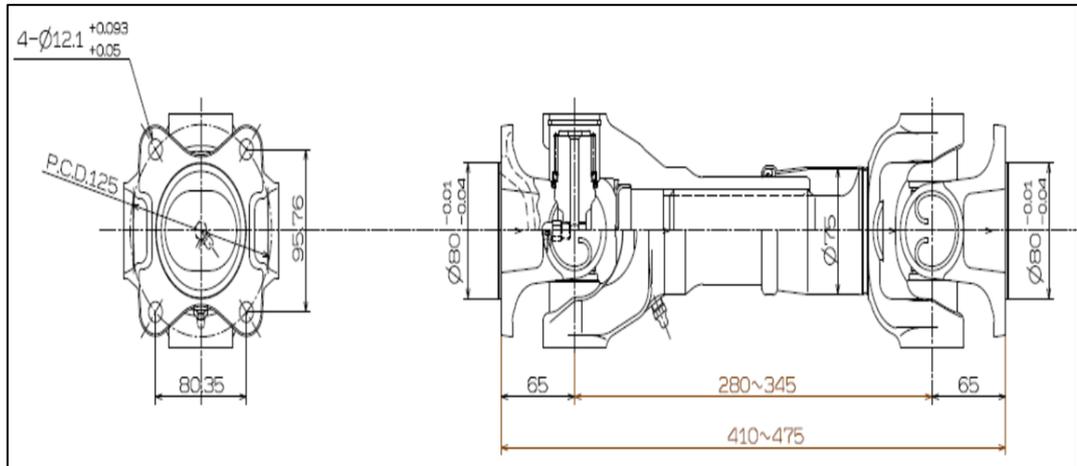
図表 43 (株)ジェイテクトで設計されたデフとCVJ



(1) プロペラシャフト

トラック用ペラシャフトをアライメント調整機能であるフレキシブルカップリング(入力軸と風車駆動軸の接合部品)の代用として使用した(図表 44)。

図表 44 (株)日野自動車製 LF0000シリーズ



(2) 検討した本仕様の適用可能性

風車の動力を発電機に伝えるための駆動系を、車載用デフ等の自動車部品を転用する改造設計をした。コスト・品質に優れた車載用部品を風車に使用する事で、その品質を維持しつつ大幅なコスト低減に貢献する。強度的に問題ない事も、パイロット試験を通じて検証された。

IV-6. エアーディスクブレーキ

トラック用エアーディスクブレーキを風車用ブレーキとして転用するための仕様作りを実施し、連系するエアー回路も構築した。テストベンチでエアーブレーキの試験を実施し、風車の通常停止、非常時の補助ブレーキ、過回転防止、緊急停止といった機能が発揮できるかを確認した。

1. ディスクブレーキ試験及び改造

トラック用エアーディスクブレーキを風車の制動に使用するのに際し、通常垂直方向で使用するものを水平方向で使用する為、水平状態で作動させてその状況を確認し、必要な改造を実施する。

(1) (株)WABC0(欧州シェアNO.1のトラック、トレーラー向けブレーキメーカー)より指摘された問題点

- ブレーキパッドとディスクの隙間を維持するために、パッドの摩耗に応じてキャリパーを持ち上げ高さを調節できるような台を設置する必要がある。
- ブレーキパッドが自重で下側に落ち引きずりを起こすので、ブレーキを解除しているときはパッドが元の位置に戻るような機構が必要である。

① 作動確認

図表 45, 図表 46に示したブレーキ試験用架台を製作し、実際にブレーキを水平に設置し、ブレーキを作動させてその状態を確認した。キャリパーにアクチュエータを取り付けてブレーキを作動させたところ、予想通り作動後にブレーキを開放しても上部パッドとその上部にあるスプレッダーは落ちたままで、元の位置には戻らなかった。その状態で、ブレーキパッド押さえ板及びパッドの耳を指で強く押し上げると、パッド及びスプレッダーは元の位置に復帰した。

以上の動作確認からコイルバネを使用すれば、上部パッドを元の位置に戻せると確信した。

図表 45 試験架台上のブレーキ(写真)



図表 46 ディスクブレーキ背面(写真)



② バネ試験 (1)

図表 47に示した試験用バネセットを試作し、ブレーキの패드押さえ板を留めているU字状の金属棒にはめ込んで取り付けた(図表 48)。

使用した押しバネは、指で戻した際の感触から10kg前後のバネ力が必要と推測し、塩ビ管で製作したスペーサーの長さを変えることでバネ力を調整した。まずバネ力8kgで試験したところ、ブレーキ開放後パッドは元に戻ったが、その動きは緩慢で3~5秒かかった。

スペーサーを交換しバネ力を14kgにしたところ、パッドはブレーキ開放後、1秒程度で復帰し、肉眼でもその動きははっきりと確認できた。

図表 47 試作用バネセット(写真)



図表 48 押さえ棒取り付けボルト(写真)



③ バネ試験 (2)

バネ試験 (1) により、必要なバネの仕様が固まったので、バネメーカーに試作を相談し候補として2種類製作された。試作したバネにて作動試験を行った。この試験の際にバネを受ける受け板も試作し併せて試験した。図表 49, 図表51は試験したバネセットで、図表51に示したバネ受け板を上下に取り付けることで、バネの力をパッド抑え板に広く分散できる。

試作したバネはどちらも問題なく作動したが、試作品Aの方がバネ力は約14kgでBの18kgより弱いですが、それでも十分な力があり最大縮み幅がBよりも大きいのでこちらを採用することとした。

図表 49 試作用バネセット(写真)



図表 50 バネ受け板拡大(写真)



図表 51, 図表 52はそれぞれ試作品AとBをセットした時の写真である。

図表 51 試作品Aセット(写真)



図表 52 試作品Bセット(写真)



以上の作動試験及びバネ試験によりコイルバネでパッドを元の位置に復帰できることを確認、必要なバネの仕様も確定できた。

キャリパを押し上げる台については、ブレーキ実機から採寸して概念図を製作し、設計に落とし込んでいる。

④ 圧縮空気回路

ブレーキを駆動するための圧縮空気回路については、圧縮空気機器メーカーであるSMC（株）に相談し、回路及び必要な機器について提案を受けて、エア回路試験を行った(図表 53)。

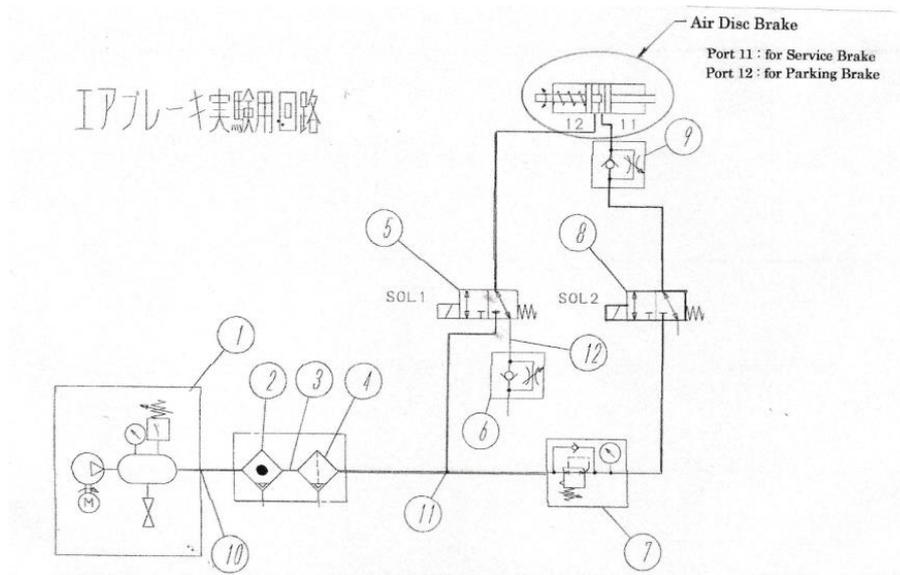
図表 54「エアブレーキ実験回路」と図表 55「機器リスト」に基づき実験用の回路を構成し、前述した動作試験及びバネ試験を実施した。

強風時に回生ブレーキだけでは風車を制御できない場合、ディスクブレーキを併用するために、ブレーキを駆動する空気圧を段階的に変化させることでブレーキ力を制御出来る様、回路を変更することにした。SMC（株）の提案により回路中の⑦レギュレータと⑧3ポート電磁弁の代わりに、電子式真空レギュレータ（以下電空レギュレータ）を設置し試験を実施した。電空レギュレータはシステム上の制約から、DC12V駆動の4点プリセット型のものを選択した。これによりOFF状態の0MPaの他に3点任意の圧力を設定することが可能になる。異なる圧力を設定する事により急停止を防ぎ、ブレーキ力の強弱を調整する補助ブレーキ的な機能を果たせる事が確認された。

図表 53 エア一回路試験



図表 54 エアブレーキ実験用回路



図表 55 エアブレーキ実験用回路機器リスト

エアブレーキ実験回路機器リスト

番号	名称	型式	個数	備考
1	コンプレッサー		1	SMC外
2	ウォータセパレータ	AMG150C-02BC	1	
3	スパーサ	Y200-A	1	
4	メインラインフィルタ	AFF2C-02C	1	
5	3ポート電磁弁	VX3324V-02-6G1-B	1	
6	スピードコントローラ	80-AS2000-02	1	
7	逆流機能付レギュレータ	AR25K-02BE-B	1	
8	3ポート電磁弁	VX3324V-02-6G1-B	1	
9	スピードコントローラ	80-AS2000-02	1	
10	継手(ハーフユニオン)	KQ2H08-02AS	10	
11	継手(チーズ)	KQ2T08-00A	1	
12	配管ニップル	PT1/4	2	SMC外
	ソフトナイロンチューブ	TU0806B-20	1	

2. 検討した本仕様の適用可能性

風車の安全運転に最重要であるメカブレーキをトラック用エアディスクブレーキの仕様を変更する事で代用できることを確認した。これにより、コスト・品質に優れた車載用部品を風車に使用する事で、大幅なコスト低減に貢献する。

もちろん、当初の目的であった、風車の安全停止、補助ブレーキ機能による過回転防止、緊急停止、保守点検時の停止保持といった機能についても十分であることも確認された。

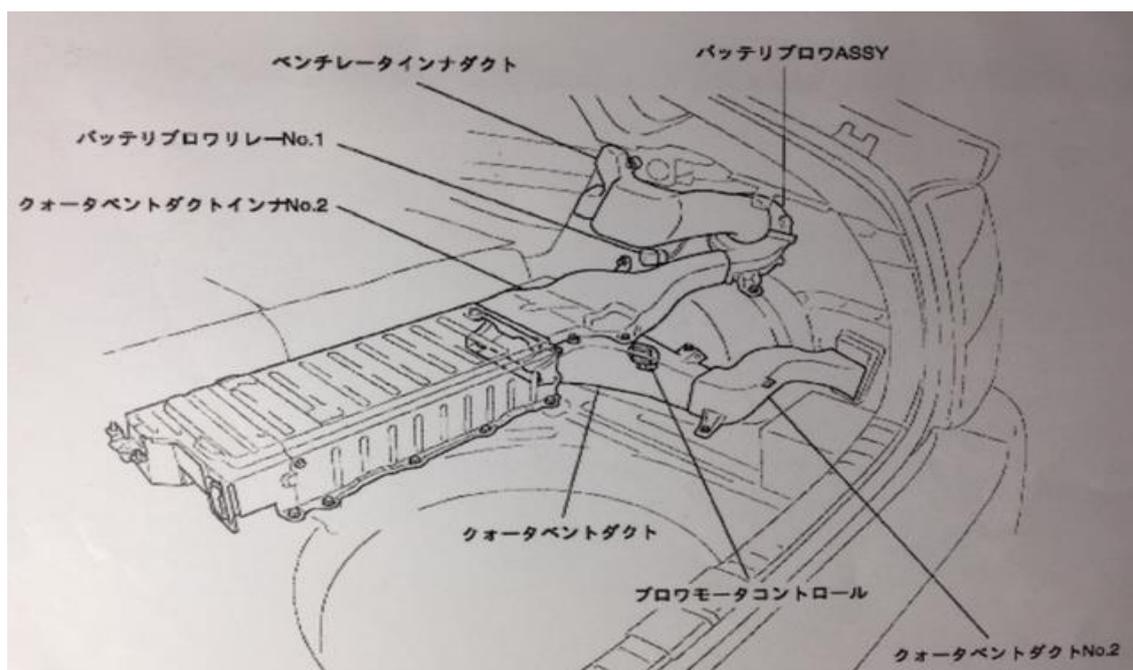
IV-7. 回収した冷却システムの風車でのリユース実証試験

1. HVバッテリー空冷システム

(1) プリウスでの冷却システム

プリウスでは室内からのエアをバッテリーフロアで吸引し、バッテリーに送り込んでいる。冷却後のエアは車外に排出されるが、ベントダクト内にフロアモータを制御するための温度センサー(フロアモータコントロール)が設置されている(図表 56)。

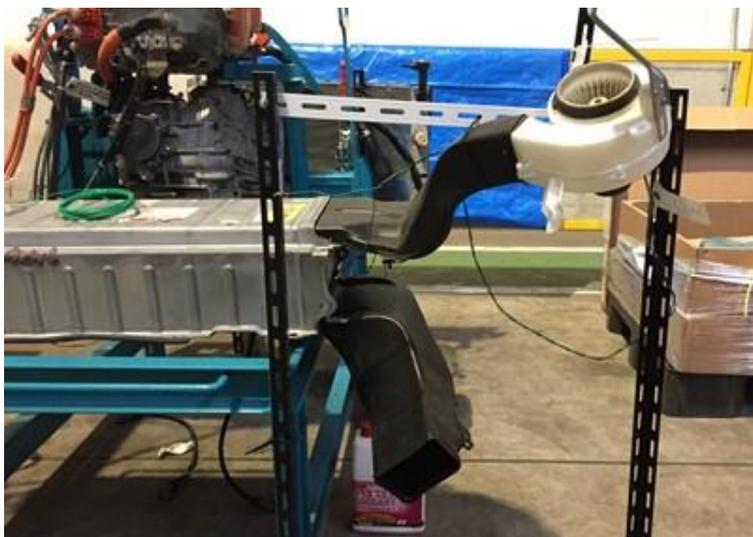
図表 56 プリウスでの冷却システム概要



① 冷却試験 (1)

バッテリーフロアにDC12Vを直接供給して運転し、その作動を確認した(図表 57)。

図表 57 バッテリー冷却試験(写真)



② 冷却試験 (2)

回収したハーネスを接続し、HV-ECUと繋ぎ実際のダクトに模擬的に熱風を吹き込ませ、あたたかもバッテリーが高温になった状態を作り出して、その際に車

載時と同様に状態監視機能が働いて自動的にブロアが回り、空冷が始まるかどうかを試験した。

結果、温度40度以上でブロアが回転開始する事を確認した。

(2) 今後の検討事項

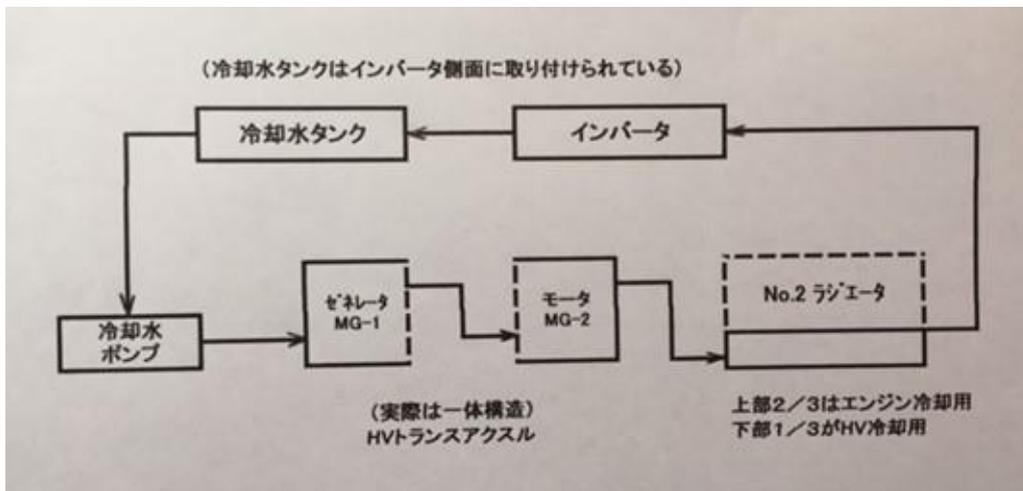
風車架台内での主要機器の配置を踏まえて、バッテリーの据付場所を決め、その場合のダクト配置と固定方法について、ダクトの改造、取付金具の製作も含めて検討する必要がある。

2. インバータ及びHVモーター水冷システム

(1) 冷却システムフロー

図表 58はインバータ及びHVモーター冷却システムの概略を示したものである。ラジエータはエアコンのコンデンサーを一体に組み付けた熱交換器(クーリングモジュール)が採用されていて、ラジエータとコンデンサーが2枚重なり合っている。更にラジエータは上部約2/3がエンジン用で、下部1/3がHVシステム用即ちインバータ及びHVモーター用に当てられている(図表 59, 図表 60)。

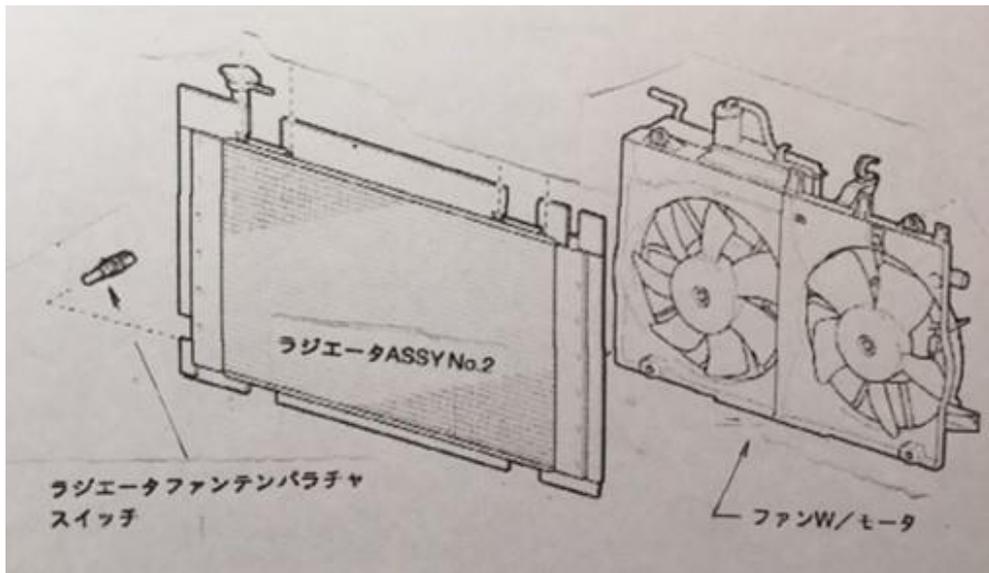
図表 58 インバータ/HVモーター冷却システム概要図



図表 59 ラジエータ仕様

	エンジン用	HVシステム用
コア形式	コルゲートフィン	←
フィンピッチ (mm)	2.5/2	←
コア寸法 (幅x高さx厚さ) (mm)	248.2x600x16	88.2x600x16

図表 60 ラジエータ概略図



(2) 冷却水循環テスト

試験中のインバータ、HVモーターにラジエータと冷却水循環ポンプを取り付けて、冷却水の循環テストを実施し冷却水が確かに循環することを確認した(図表 61, 図表 62, 図表 63)。

図表 61 冷却試験中のユニット(写真)



図表 62 ラジエータ部拡大(写真)



図表 63 ウォーターポンプ冷却循環試験(写真)



(3) 今後の検討事項

今回の実証により、車載での水冷システムのリユースについては、再現可能であることが確認されたが、風車としての使用環境の違いにより以下の検討が今後必要である。

- ・冷却能力の見極め
- ・風車がフル稼働した場合に冷却能力がどの程度必要か？

上記2点を確認の上、必要に応じて以下の i)、ii) の対応をすることを今後検討していく。

- i) 冷却能力が不足した場合エンジン用の部分も使用すれば、冷却面積は3倍以上となる。
- ii) 2つあるラジエーターファンの運転方法を直列から並列に切り替えることで冷却能力を増加することができる。

3. 検討した本仕様の適用可能性

1. 水冷、2. 空冷ともに車載での性能と同じ機能が風車で再現できる事が実証により検証できた。空冷は、HV-ECUのシステムの一部として制御しているが、水冷はHV制御システム外である。このため、風車を制御しているTOYOPCUの状態監視機能の一つであるインバータ温度から異常（60度以上）のサインが出たら、ラジエーターファンを作動させて冷却水を冷やす指令を出す必要がある。

IV-8. 風車全体システム信頼性評価

1. 評価方法

本章を通じて行ってきたHVユニット、車載部品の風車への仕様変更について、個別には、それぞれ適用可能性を評価して問題ない事が確認できた。本項では、これを確固たるものにするために、風車全体としてのシステム設計の信頼性について評価を実施した。大型風車の設計評価に世界的に実績があり、「Bladed」という風車性能解析ソフトを所有するDNV・GL（株）に荷重解析を依頼した。

風車とは、本来風が持つエネルギーによって翼が回転し、発電するシステムである。従って、本実証の小型風車の構造をモデル化（図表 64）し、「Bladed」に付属する国際風車設計基準IECの「風モデル」（図表 65）を使って、実際の風車の挙動を3次元動的に解析する。解析した結果、風速とその発電量が、本章を通じて行った仕様作りの前提である前項での解析結果と整合性があるかどうかを比較検証する。これによって、風車全体のシステム設計の信頼性を確認した。

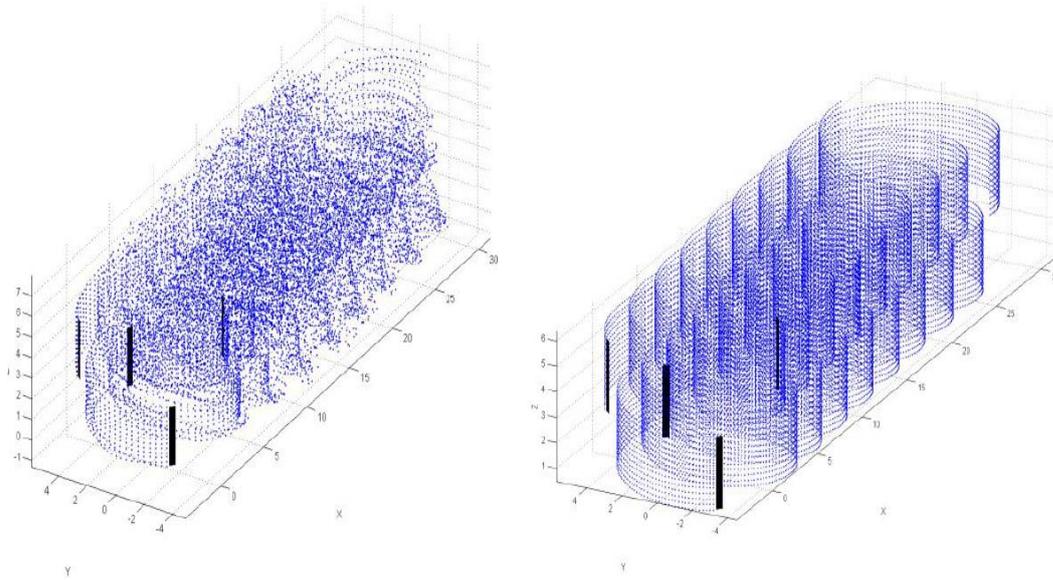
2. モデル化

今回特にモデル化にあたり、2つの手法を行った。

1つ目は、「Free Wake」と言われる手法である。4枚ある各翼に風があたると翼後流中に渦が生み出され、さらに、翼が回転しているため、空間中の渦が相互に影響を受けて、あたかも乱流が発生しているように観察される。この渦相互間の影響も考慮して、風車の挙動を解析する手法が、「Free Wake」である。これは、より実際に起きる空力に近く、モデル化や計算に時間はかかるが、結果の精度が高い（図表 64左）。

それに対して、2つ目は、「Fixed Wake」と言われる手法で、上記と違って渦相互間の影響は、一定として平均化し、簡易化したモデルである（図表 64右）。

図表 64 小型風車をモデル化してその挙動を解析



3. パワーカーブ

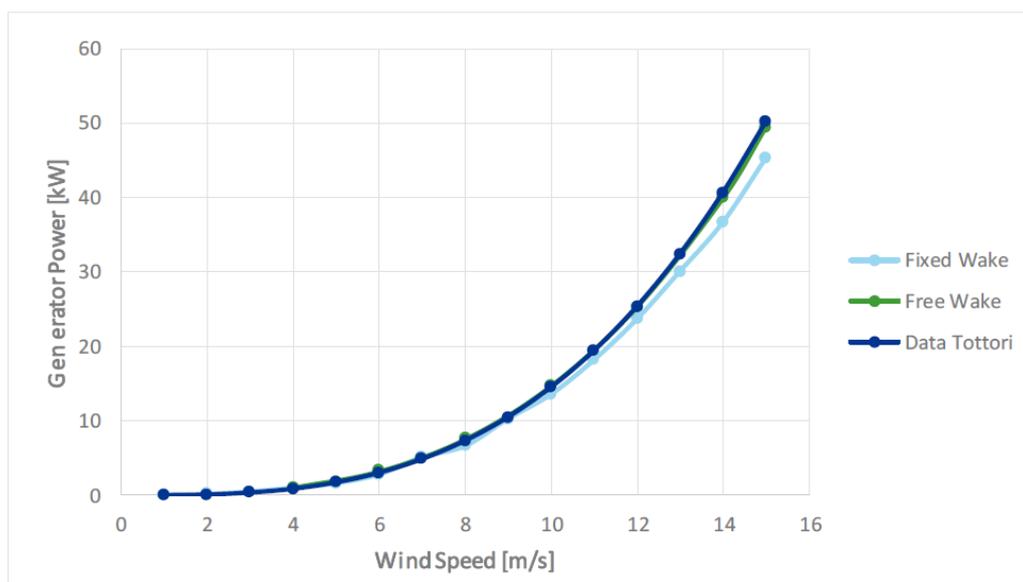
2. でモデル化した2つの手法に対して、図表 65の「風モデル」を利用して発電のシミュレーションを行った。

図表 65 挙動解析に使用する国際風車設計基準の「風モデル」

Design load case (DLC):	1.2		
Operating condition:	Power production		
Wind conditions:	Steady wind, $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		
Type of analysis:	Fatigue/Ulimate (normal)		
Partial safety factors:	Normal		
Description of simulations:			
Description	Mean wind speed (m/s)	Wind bin	Hours / year
1.2a	4	3-5	1262.1
1.2b	6	5-7	1525.6
1.2c	8	7-9	1503.6
1.2d	10	9-11	1274.4
1.2e	12	11-13	951.2
1.2f	14	13-15	633.1
-wind speed constant, no turbulence modelled - Rotor speed constant			

図表 66にてシュミレーションした結果を示す。同時に今回の目的である「全体システム信頼性評価」を確認するために、本章での仕様作りの前提となっている前章でのシミュレーション結果（図表 31のMax_P[W]を縦軸、V [m/s] を横軸）を比較対象とし、図表 66に Data Tottoriとして表記した。

図表 66 パワーカーブの比較検証



図表中より「Free Wake」のパワーカーブと比較対象であるData Tottoriのパワーカーブが完全に一致して重なっている事が観察される。

4. 結論

今回比較対象とした前章のシミュレーションは、2次元静的な解析の下で行われた。これを本項にてより高度で精度の高い3次元動的な解析で比較検証した。結果、2つの解析手法から得られたパワーカーブは同一であった。

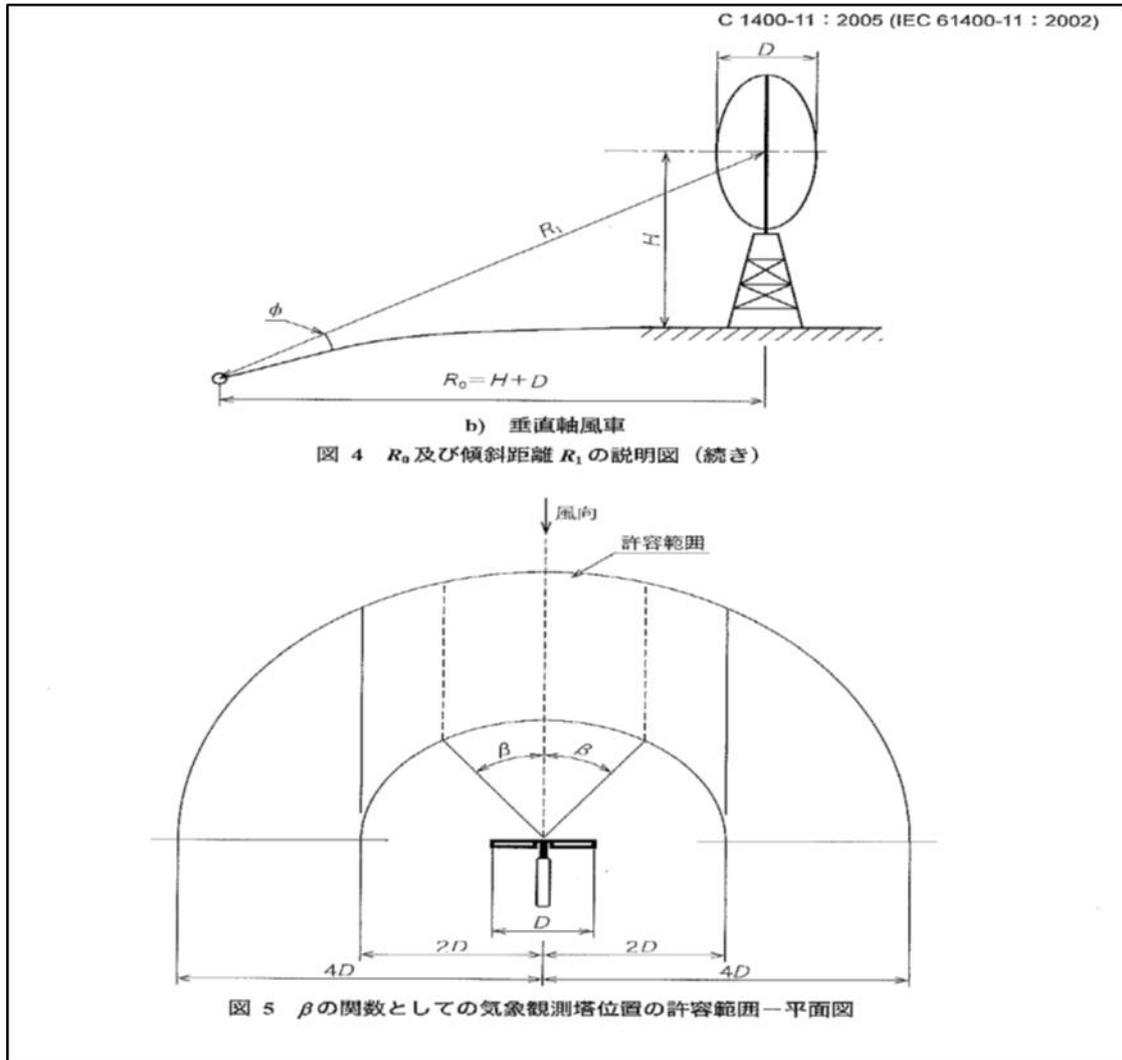
上記結果から、仕様作りの前提条件が正しい事が比較検証され、本事業で行った信頼性評価を高めるものとした。

IV-9. 小型風力発電システムの環境影響評価試験（騒音試験）

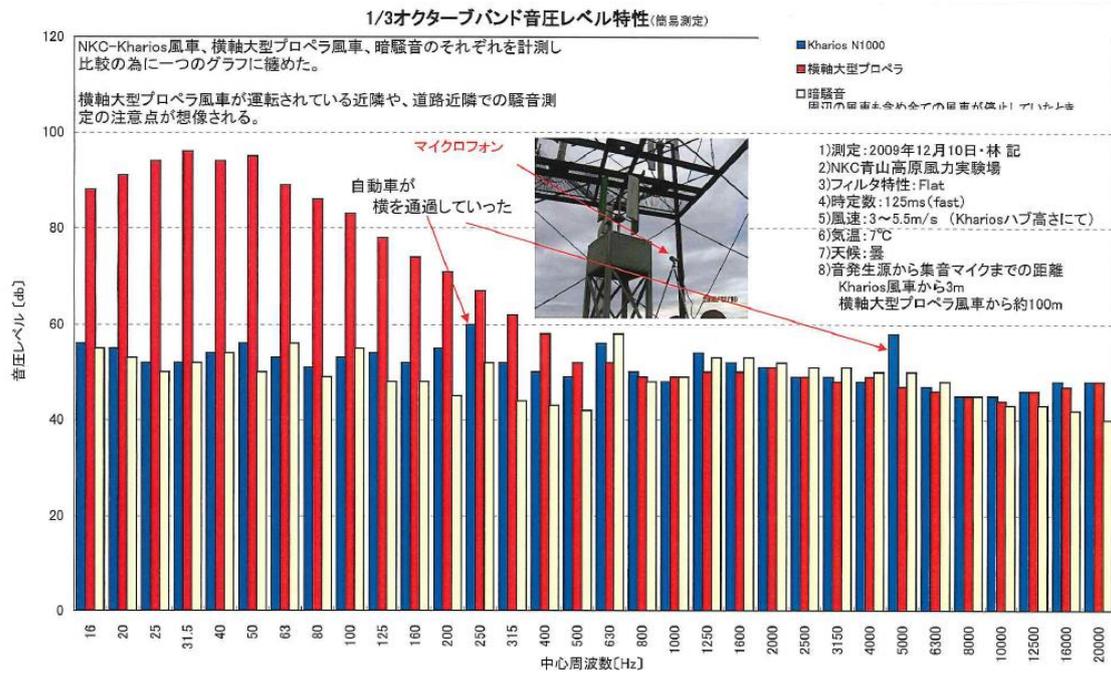
プロト機を中心に実際の風車から起きる騒音を実測し、環境への影響評価を実施した。騒音の計測方法、評価方法については、「小型風車の性能及び安全性に関する規格」第3項騒音計測試験にある JIS C 1400-11: 2005（図表 67）に従って行った。

図表 68で示す通り、三重県青山高原にて同タイプの風車の騒音調査を実施したところ、低周波数帯域においては大型風車の約2分の1の騒音が測定され、中・高周波域では、風車が停止している状態の暗騒音とほぼ同じ騒音レベルであった。これらの結果から、小型風力発電システムの環境影響は十分小さいものと判断できる。

図表 67 JIS C 1400-11:2005により規定された騒音測定方法



図表 68 小型風力発電システムの環境影響評価試験(騒音試験)結果



V. HVユニットを利用した小型風力発電事業の経済性評価

V-1. HVユニット利用小型風車のイニシャルコスト

図表 69に本事業を通じて製作したHVユニットリユース小型風車プロト機のイニシャルコスト、事業開始時及び量産時の目標コストを示す。現在（プロト機）は一台一台個別に生産していることから組立コストや各 부품の調達コストが高くなっているが、これを量産体制に持ち込むことで、さらなるコスト低減が可能と見込まれる。

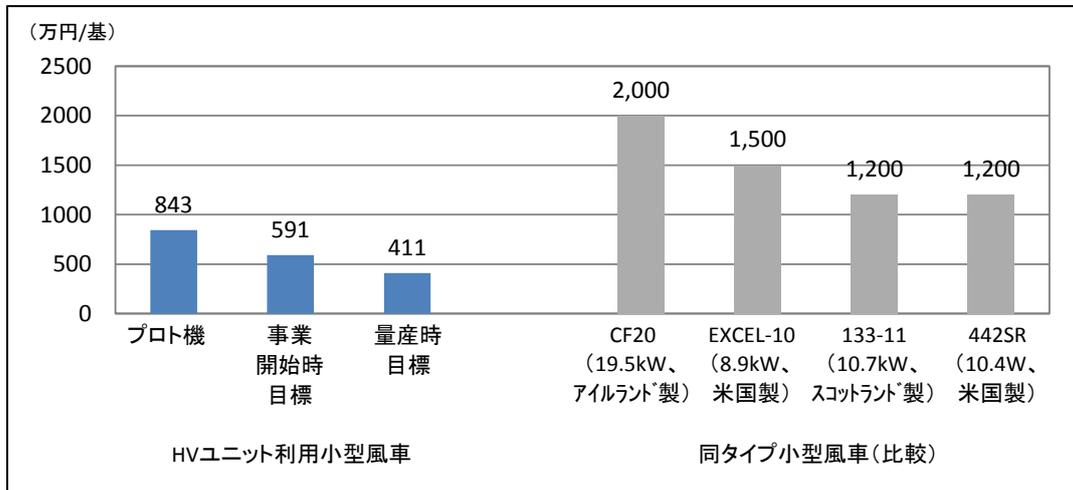
図表 69 HVユニット利用小型風車の現状イニシャルコストと目標(万円)

	プロト機	事業 開始時 目標	量産時 目標
・HVユニット ・増速機	50	50	35
・CFRP翼 ・ストラッド	107	67	55
・ロータ軸 ・支柱 ・駆動軸 ・ブラケット ・軸受 ・ブレーキ軸 ・他	95	75	40
・基礎、架台	250	166	100
・インバータ/HVユニット	40	30	20
・ブレーキ	25	20	20
・ベアリング	6	6	6
・カップリング	28	20	10
・SSR ・制御盤	120	100	80
・パワコン	66	22	15
・風速計	6	5	5
・組立/現地施工	50	30	25
計	843	591	411

図表 70に本事業の小型風車と現在市販されている同タイプの風車とのイニシャルコスト比較結果を示す。現在のプロト機の製作費でも900万円以下であり、現状同タイプで販売されている風車と比較しても既に十分コスト競争力がある。

これは、本来高価な風車部品である発電機、駆動系ユニット、ブレーキなどをHVユニットや車載部品を使うことで、コストを削減しているからである。

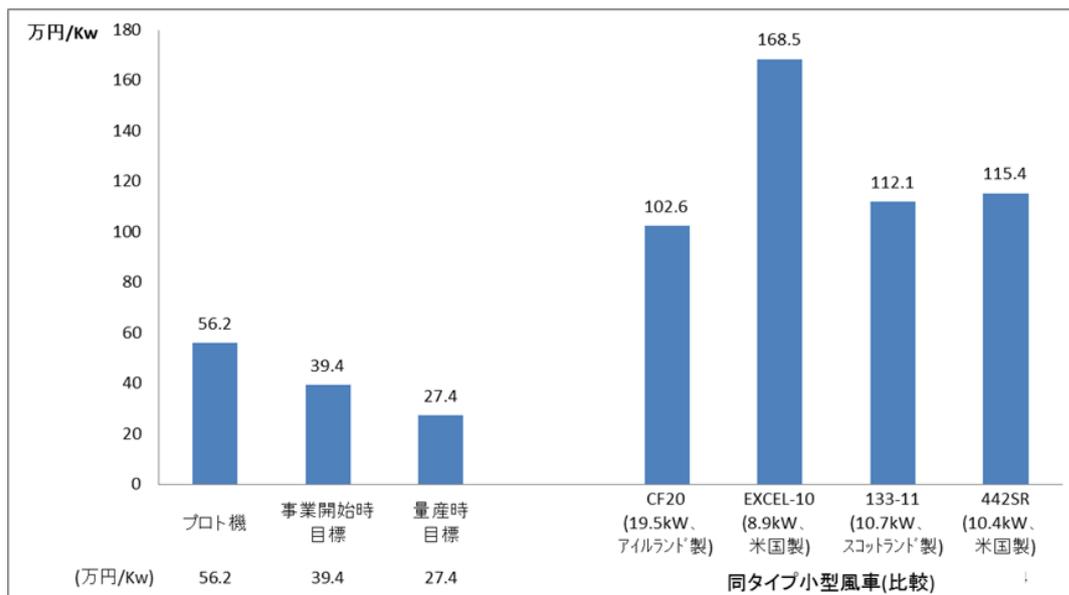
図表 70 同タイプ小型風車とのイニシャルコスト比較



通常、発電システムのコスト評価は、イニシャルコストを定格出力 (kW) で割った、kW当たりのコストで比較する。図表 71にて、図表 70をkW当たりコストで比較すると本事業の小型風車のコスト優位性がより明瞭となる。

尚、大型風車については、現在kW当たりコストが約30万円/kWとなっており、量産時では、本来規模の経済性がある大型よりも競争力がある目標となっている。

図表 71 同タイプ小型風車との比較 (kW当りコスト比較)

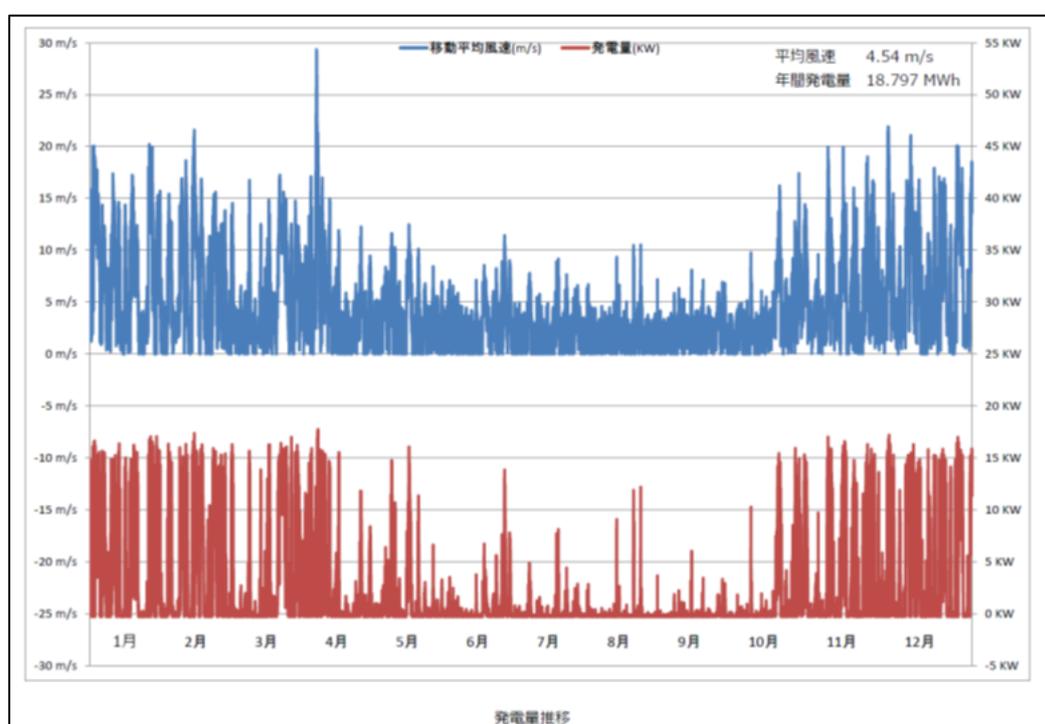


V-2. HVユニット利用小型風車の発電性能

1. 発電性能の検証

IV-3.1で作成したシミュレータとIV-3.2で開発した制御アルゴリズムの検証を行うために、JR東日本(株)(以下JR)の協力を得て、秋田県での鉄道沿線実測風況データを入力しこれをもとに発電シミュレーションを実施した。JRのデータに高さ補正を行った結果、年間平均風速は、4.54m/sとなった。これを基にシミュレーションすると年間発電量は18,797kWhとなった(図表72)。

図表 72 JRデータの発電シミュレーション

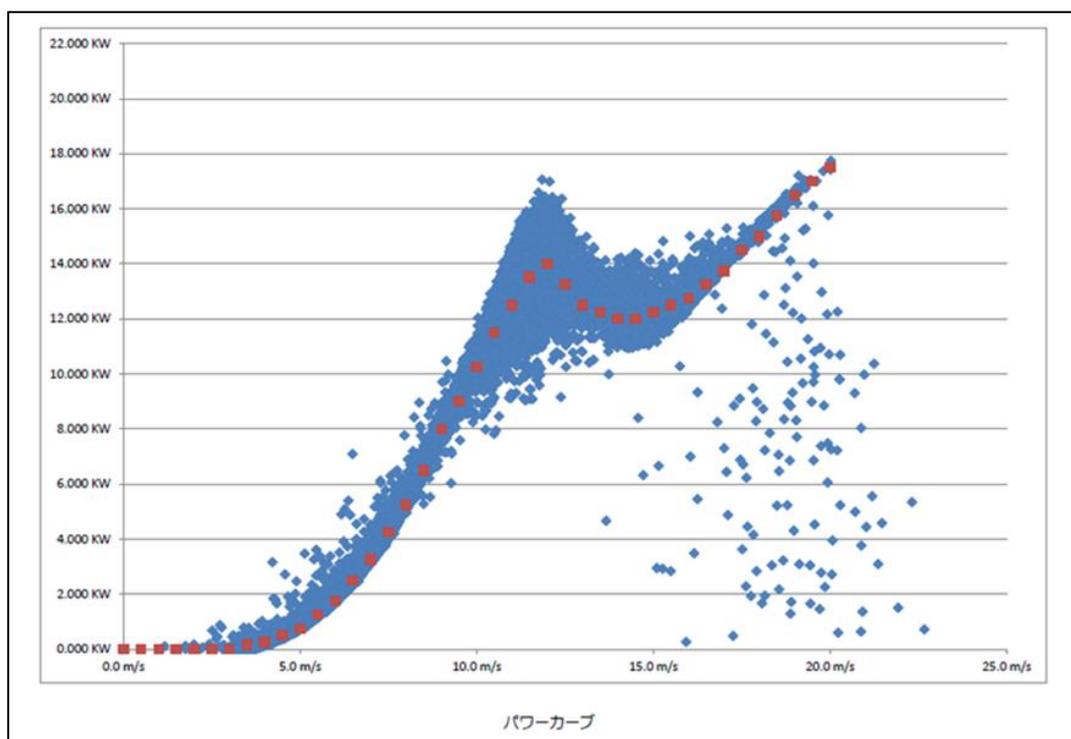


図表72から分かる通り、10月の後半から4月半ばまで10m/sから20m/sの強い風が吹く。しかもかなりの頻度で15m/sを超えるため、IV-3 図表27で示した15m/sで停止させる制御では、極めて設備利用率が低下し、発電量が稼げない事が判明した。

そこで、新アルゴリズムとして、風速15m/s以上でも、大きく周速比を下げて風車の回転数を落として、風速25m/sまでは、停止させずの運転継続する制御とした。これを可能にしたのは、IV-6で実証した、エアブレーキシステムの性能により、最も危険である高風速域での突風に対して風車の回転をいつでも瞬時にメカ的に抑制できる事が試験で検証されたからである。

これにより改良したパワーカーブを図表73で示す。

図表 73 JRデータから改良したパワーカーブ



この図表 73から、風速15m/s以上の風速域でもかなりの発電量を稼いでいる事が確認できる。

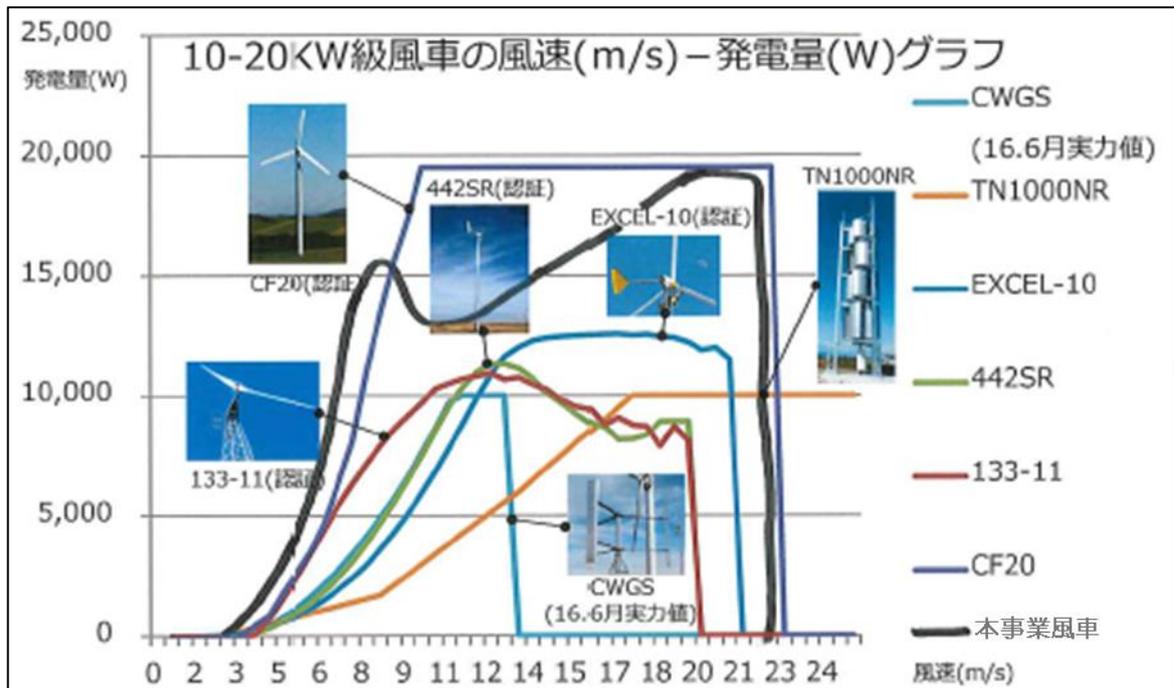
このように、風況の合わせた最適チューニングをする事により、本事業のHVユニットリユース小型風車は、高い発電性能が期待できることが確認された。

2. 小型風車市場調査と優位性の確認

本事業のHVユニットリユース小型風車が、同タイプ小型風車と発電性能を比較した。比較した対象は、既に売電事業を行うための認証が取れている市場では性能が高いと評価されている外国産の風車とした。風車にはそれぞれ定格出力があり、今回本事業の15kWに近い、10-20kW級に風車を選んだ。

その結果、図表 74に示す通り、同環境、同タイプの小型風車と比較しても高い発電性能を有している事が確認された。

図表 74 HVユニット利用小型風車の発電量と同タイプ小型風車との比較



V-3. 経済性評価の結果

図表 75に経済性評価の前提条件を示す。小型風車のイニシャルコストは、事業開始時目標コスト(591万円)を設定した(図表 69)。ランニングコストは風車の運転期間を固定価格買取期間の20年とし、土地/税金：50万円、メンテナンス/部品交換費用：160万円から単年のランニングコストを10.5万円/年としている。

発電量は、平均風速を5 m/sとして、翼出力を出力28,000 kWh/年(図表 35)、伝達効率0.7とし、年間発電量を20,000 kWh/年と設定している。発電電力からの収入は、(A)独立電源(オフグリッド)として企業が一般的に払う電気代相当22円/kWh(豊田通商(株)関連事業会社にて調査)、と(B)20kW未満の風力発電に対する固定買取価格(オングリッド)である55円/kWhの2パターンを設定している。

経済性評価は、小型風車のイニシャルコストに対して、電気価格(A)、(B)の場合の計2パターンで試算を行った。

尚、独立電源として(A)の場合は、「再生可能エネルギー事業者支援事業補助金(イニシャルコストの3分の1補助)」が適用される前提とした。

図表 75 経済性評価の前提条件

	数値	考え方
イニシャルコスト	(A) 394万円	補助金あり
	(B) 591 万円	補助金なし
ランニングコスト	10.5 万円/年	風車の運転期間：20年 土地/税金：50万円 メンテナンス/部品交換 費用：160万円 単年のランニングコス ト：(50+160) /20=10.5 万円/年
発電量	20,000 kWh/年	平均風速5 m/sとして、翼 出力28,000/kWh/年×伝 達効率0.71 = 19,880 /kWh/年
収入電気価格	(A) 22 円/kWh	一般家庭・企業が払う電 気代を前提
	(B) 55 円/kWh	出力20/kW未満の風力発 電のFIT買取価格

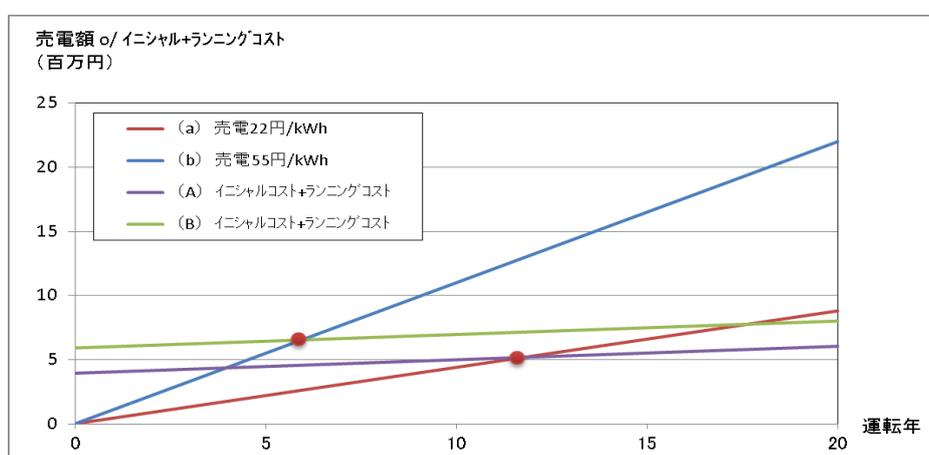
以上の前提条件で経済性評価を行った結果を図表 76に示す。小型風車のイニシャルコストを394万円とした場合（ケース（A））では、電気価格（A）22円/kWhの場合は投資回収期間が約12年、収入売電価格（B）55円/kWh（出力20 /kW未満）の場合は投資回収期間が約6年となった。

イニシャルコストを事業開始時コストとした場合、電気価格が低い22円/kWhの設定においても運転期間12年以内の投資回収が可能となる結果となった。

これは、設備耐用年数である20年に比べて十分短く投資効果は高いと判断する。

もちろん、今回設定した年間平均風速5m/s以上の風況地に設置すれば、経済性が、さらに向上する事も補足しておく。

図表 76 小型風車のイニシャルコストケース別の経済性評価

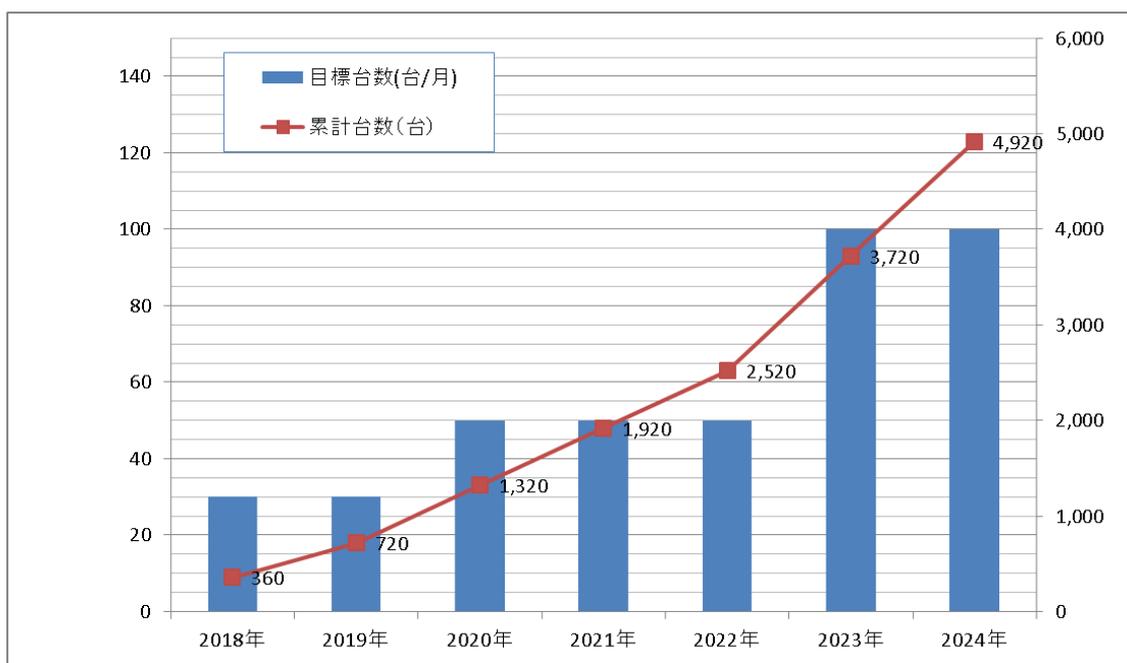


以上より、量産効果が十分に出る前の事業開始時目標コストで経済性を評価しても十分な経済性がある事が確認されたが、今後の課題として以下に言及する。

- 量産コストの達成による経済性向上
- 伝達効率の向上による発電性能の更なる向上
- ライニングコストを精査
- 独立電源での電気代、地域別、大口・小口別、季節別調査
- 長期的な電気代の予測
- 離島や特定グリッド未整備地域での経済性の検証
- 災害時の非常電源とした場合の効果を考察

尚、量産の時期、台数については、図表 77を目標とする。

図表 77 量産の時期と目標台数及び累計台数



この目標を設定するために、図表 78に示す「市場ポテンシャル」に対する調査を行った。

図表 78 市場ポテンシャル

■市場ポテンシャル調査 (※日本のみ)	
1・ トヨタグループ各工場での独立電源	500台
2・ 秋田県等好風況地での独立(非常)電源	1,000台
3・ JR東日本鉄道沿線所有地での売電事業	3,000台
4・ ユーラスエナジー大型風車ファーム内	1,500台

他にも、日本各地官公庁、JR北海道、各空港、湾岸、被災地など調査中

調査先は、次の通り。

- ・ トヨタ自動車(株)各工場(トヨタ自動車北海道、トヨタ自動車東日本、トヨタ自動車九州)
 - ⇒風況の良い立地にあるトヨタ関係各社を訪問し、小型風車の需要について把握
- ・ 秋田県庁
 - ⇒風況が良く、小型風車に適した県庁保有候補地を紹介
- ・ JR東日本エネルギー開発(株)
 - ⇒風況の良いJR所有地で小型風車設定候補地を提示
- ・ ユーラスエナジー(株)
 - ⇒大型ウィンドファーム内にて小型風車設定可能台数を推定

VI. 環境負荷低減効果

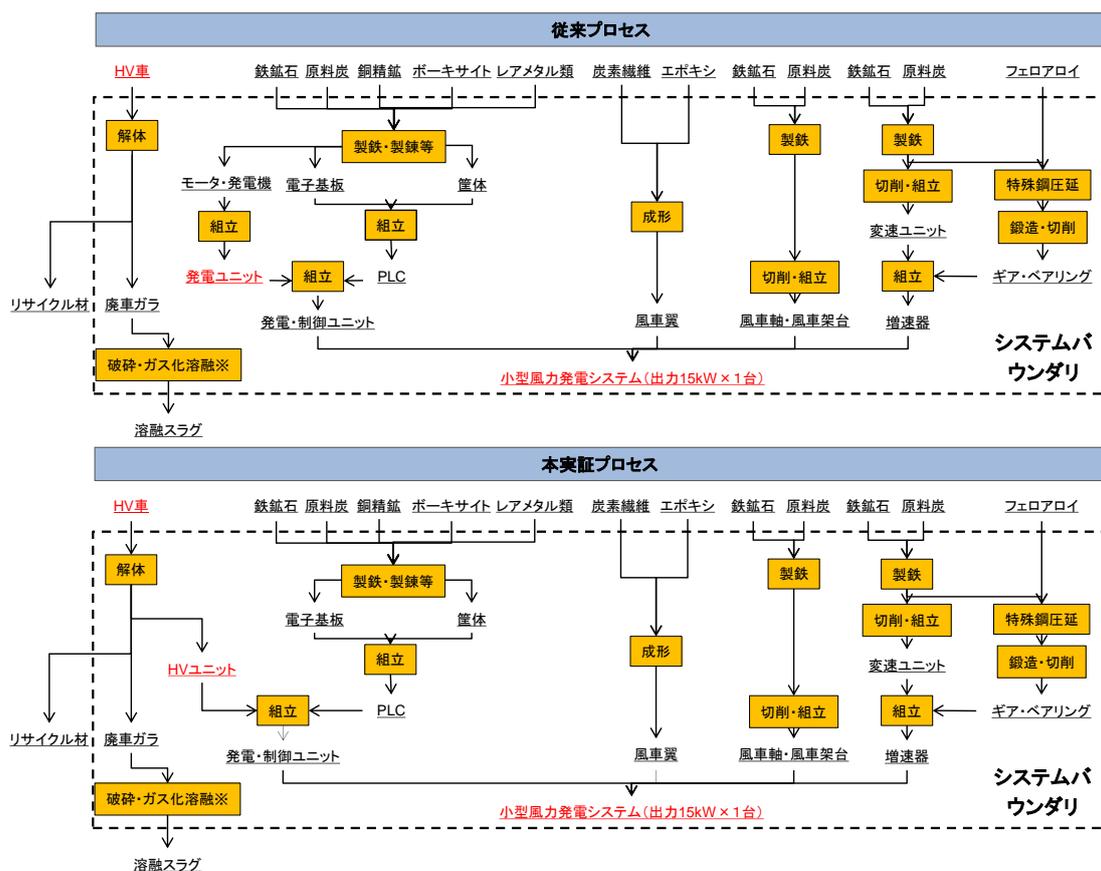
VI-1. CO2削減効果（HVシステムのリユース）

1. 機能単位

本実証では、HV車の部品をリユースすることで得られる環境負荷低減効果を評価することを目指す。機能単位を「HV車(プリウス) 1台の処分、小型風力発電システム1台の製造」とし、リユース部品を利用することによる環境負荷削減効果を定量的に評価する。

図表 79に従来プロセスと本実証プロセスのシステムバウンダリを示す。本報告書においてシステムとは分析の対象とする個別のプロセスを表しており、システムバウンダリとは、当該システムにおいて環境負荷分析の対象とする範囲を表している。

図表 79 システムバウンダリ（従来プロセスと本実証プロセス）



（注1）本図では視認性の問題からプロセスを表記捨象しているが、LCAでは計算対象に含めている。

（注2）小型風車の原料について、最終製品である小型風力発電システムの総重量に占める割合が1%未満の部品については評価対象外としている。

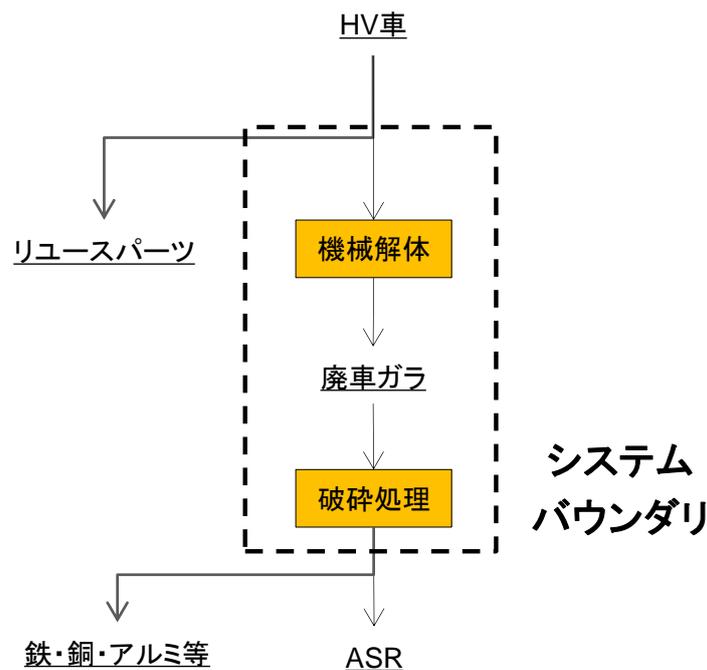
図表 79で示したシステムを構成する、個別プロセスのバウンダリは以下のとおりである。

(1) HV車の解体・破碎・選別プロセス（従来方式・本実証方式共通）

プリウス1台の処理を評価対象とする。図表 80に解体・破碎・選別プロセスにおける環境負荷分析のシステムバウンダリを示す。なお、プリウス1台を解体し、シュレッダー処理して鉄スクラップ、非鉄スクラップ（銅、アルミニウム）、ASRを得るまでを、解体・破碎・選別プロセスにおけるシステムバウンダリとして想定した。

プリウス以外のマテリアル投入については、特にその製造段階の環境負荷等を特に考慮しないものとしたほか、解体等で発生した部品類の解体段階の環境負荷等も特に考慮しないものとした。

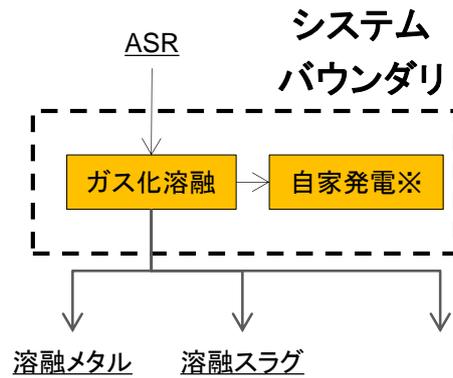
図表 80 システムバウンダリ（解体・破碎・選別）



(2) ガス化溶融プロセス（従来方式・本実証方式共通）

ASRのガス化溶融処理を評価プロセスとし、環境負荷計算に際してはASR中に含まれる炭素由来のCO2も計上し、自家発電によるCO2削減効果も考慮する。図表 81にガス化溶融プロセスにおけるシステムバウンダリを示す。ASRをガス化溶融施設で処理し、溶融メタル、溶融スラグ、溶融飛灰の発生までをバウンダリとして想定した。

図表 81 システムバウンダリ（ガス化溶融）

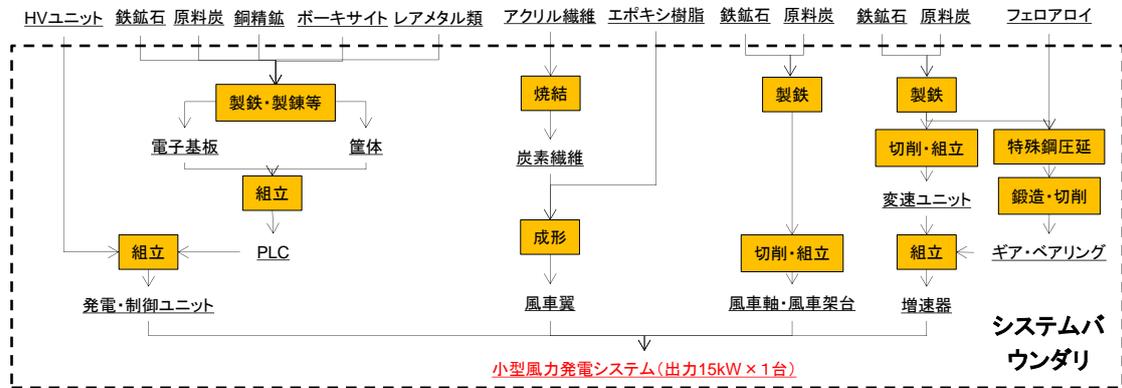


(注) 自家発電によるCO2削減効果も計算対象に含めている

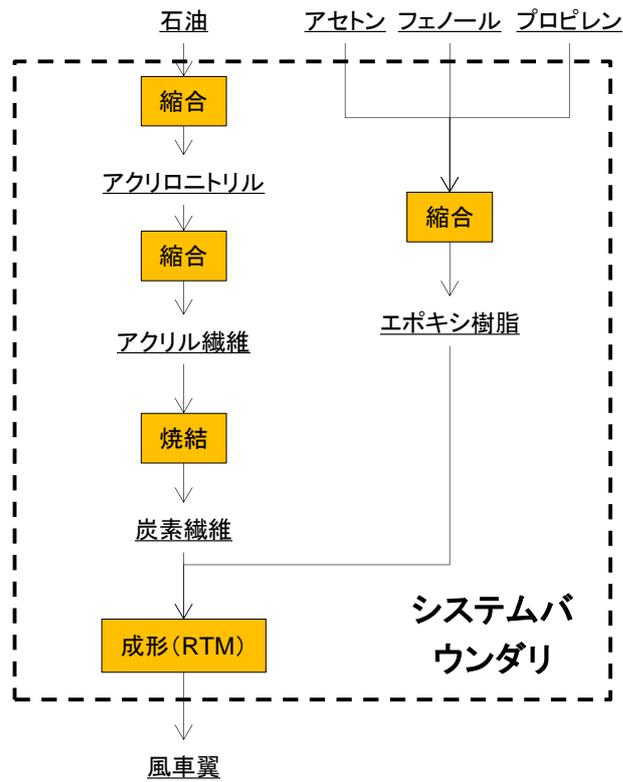
(3) 風車製造プロセス（従来方式・本実証方式共通）

小型風車一台の製造を分析対象とした。図表 82に風車製造プロセスにおけるシステムバウンダリを示す。風車は発電ユニット、風車翼、風車軸・風车架台、増速器の4部分からなり、それぞれの製造プロセスをバウンダリとして想定した。図表 82～図表 85 に個別プロセスのバウンダリ詳細を示す。

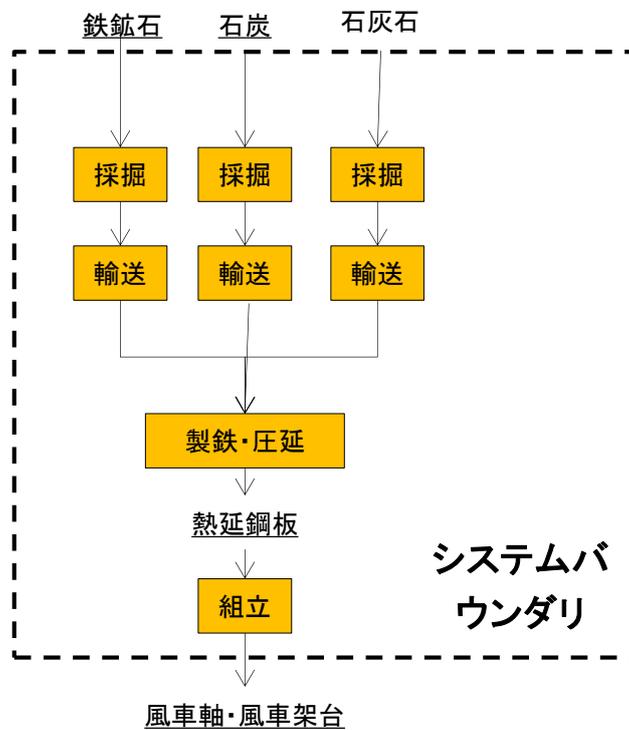
図表 82 システムバウンダリ（小型風力発電システム作成）



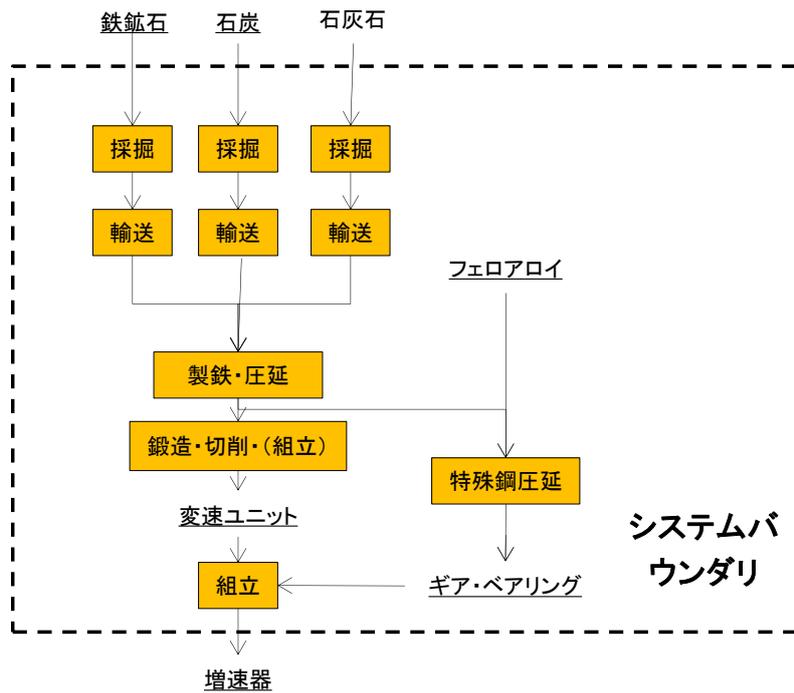
図表 83 システムバウンダリ（風車翼製造）



図表 84 システムバウンダリ（風車軸・風車架台製造）



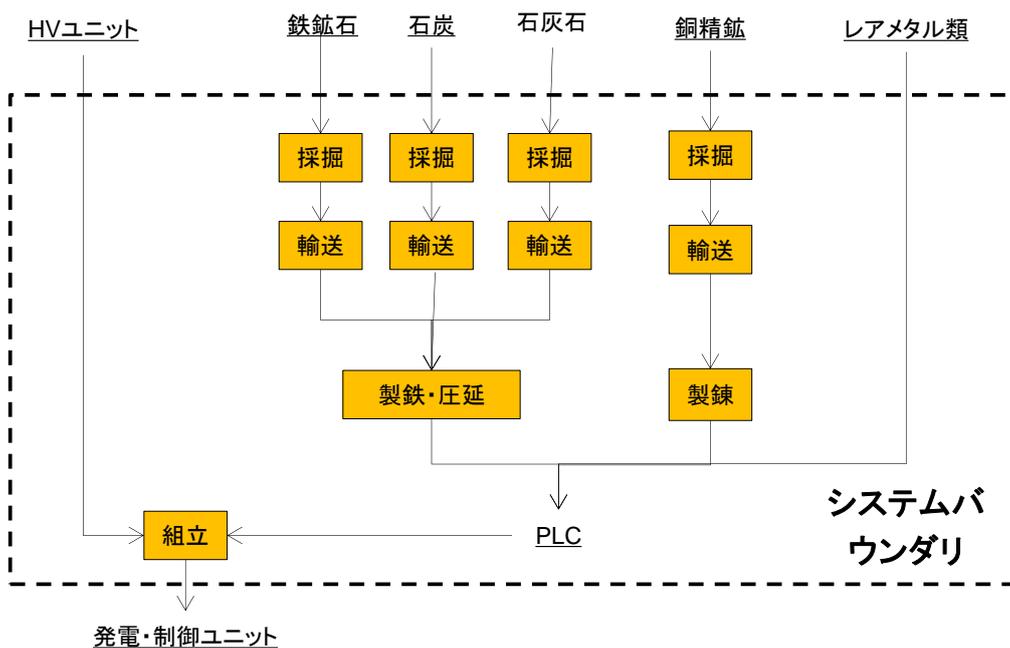
図表 85 システムバウンダリ（増速器製造）



(4) HVユニットをリユースした発電ユニット製造（本実証方式のみ）

風車翼、風車軸・風車架台、増速器のユニットは新規方式と共通のため、発電ユニットの製造のみ個別に評価する必要がある。本実証方式においてはHVユニットをリユースした発電ユニット製造を想定する。図表 86に風車発電ユニットの新規製造プロセスにおける環境負荷分析のシステムバウンダリを示す。

図表 86 システムバウンダリ（HVユニットをリユースした発電ユニット製造）

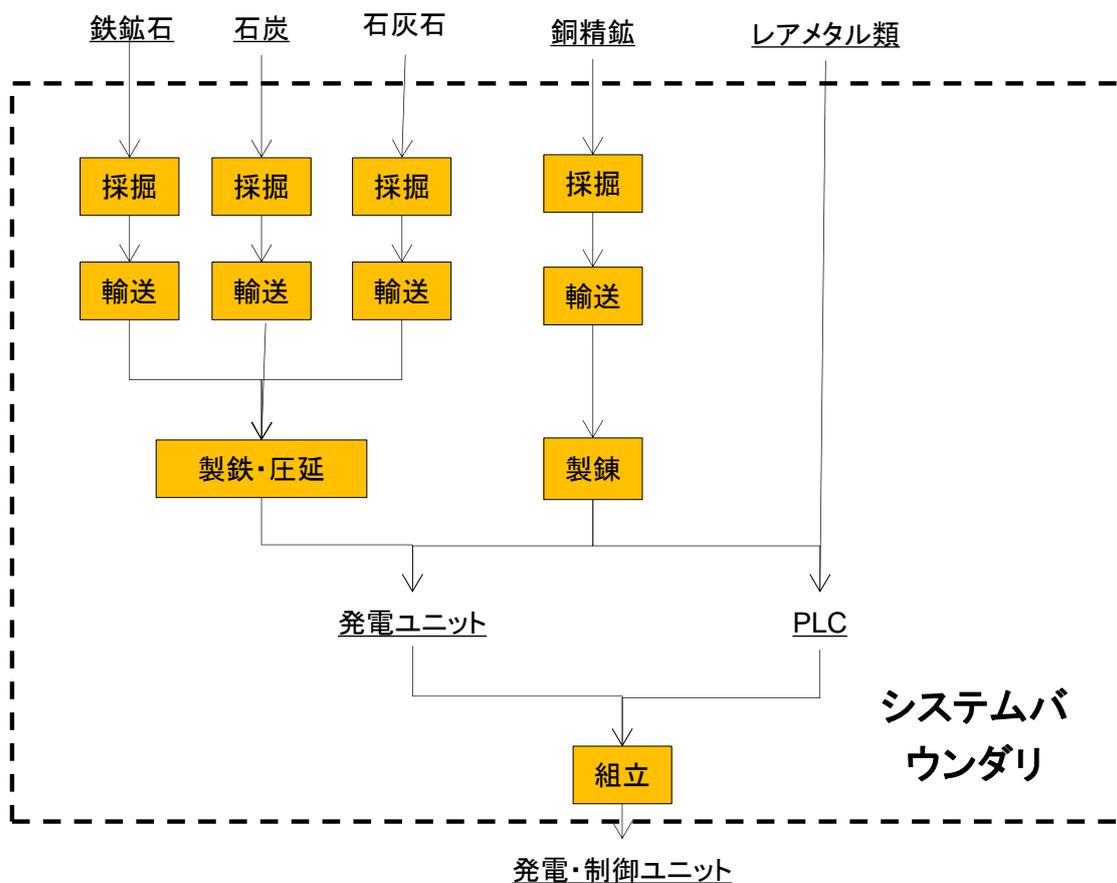


(5) 風車発電ユニットの新規製造プロセス（従来方式のみ）

風車翼、風車軸・風車架台、増速器のユニットは新規方式と共通のため、発電ユニットの新規製造のみ個別に評価する必要がある。従来方式バウンダリにおいては風力発電システムの新規製造を想定する。

図表 87に風車発電ユニットの新規製造プロセスにおける環境負荷分析のシステムバウンダリを示す。HVユニットをリユースした場合と同様の仕様の発電ユニットを新規に作成することを想定する。

図表 87 システムバウンダリ（風車発電ユニットの新規製造）



2. インベントリ算定項目

投入関係では、処理対象物（HV車）、小型風車原料、電力、各種燃料（ガソリン、軽油、重油、一般炭など）などを対象とした。排出関係では、最終製品（小型風車システム）、被処理物（シュレッダー後のスクラップ、ASR等）、CO2及び廃棄物（スラグなど）を対象とした。

3. インベントリデータ算定とCO2排出量の算出

(1) HV車の解体・破碎・選別プロセス（従来方式・本実証方式共通）

図表 88に解体・破碎・選別プロセスのインベントリを示す。工程を事前解体工程、破碎・選別工程の2工程に分け、それぞれの工程について、投入（Input）と排出・生産（Output）を記述している。

なお、今回リユースされる主要なパーツ類（モーター、バッテリー等）は、従来プロセスにおいても事前解体工程で取り外されるパーツ類であり、風車製造の有無によらず廃車ガラ発生量、ASR発生量は変化しないものとしている。

図表 88 環境負荷のインベントリ（解体・破碎・選別）

	投入（Input）	排出・生産（Output）
事前解体工程	【実証結果からの推計等】 ・ HV車：1,250（kg/台）	【実証結果からの推計等】 ・ HV車①（廃車ガラ）：700（kg/台） ・ HVバッテリー：38（kg） ・ ブローファン：1.3（kg） ・ インバータ：21（kg） ・ HVモーター：106（kg） ・ エンジンマウンティング 2.4：（kg） ・ ラジエーター：9（kg） ・ メインワイヤ、等：8.6（kg） ・ フレームワイヤ：1.6（kg） ・ その他：362（kg/台） ※1 部品重量は実証値を利用 ※2 廃車ガラ重量は、文献aに記載の数値を自動車重量比で補正して算出 ※3 手解体のため、エネルギー消費によるCO2発生はないものとした。
破碎・選別工程	【実証結果からの推計等】 ・ HV車①（廃車ガラ）：700（kg/台） ・ プレス機電力消費量：5（kWh/台） ・ シュレッダー電力消費量：48.2（kWh/台） ※消費電力は、文献bより廃車ガラの単位処理重量当たりの必要電力を算出し、その値を用いて推計	【実証結果からの推計等】 ・ ASR：155（kg/台） ・ 金属スクラップ：545（kg/台） ※1 ASR重量は、文献aに記載の数値を自動車重量比で補正して算出

- a) 酒井(2015)「使用済み自動車(ELV)の資源ポテンシャルと環境負荷に関するシステム分析」
 b) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング(2016)「平成27年度低炭素3R技術・システム実証事業（自動車リサイクルの全体最適化を念頭に置いた解体プロセスの高度化実証事業）報告書」

(2) ガス化溶融プロセス（従来方式・本実証方式共通）

図表 89に、ガス化溶融プロセスのインベントリを示す。参考文献においては1トンのASRの処理を想定しており、そこから単位処理重量当たりの原単位を算出し、推計を行った。

なおガス化溶融プロセスの環境負荷計算に際しては、ASR中に含まれる炭素由来のCO2も計上することとし、CO2排出量原単位も参考文献c)に記載の1.24

tCO₂/t-ASRを利用した。またプロセスエネルギーのCO₂排出量原単位も参考文献c)に記載の、コークス：0.529 tCO₂/t-ASR、LPG・軽油：0.0221 tCO₂/t-ASRを利用した。自家発電によるCO₂削減効果については、平成27年度実績の電気事業者別排出係数に基づき、0.491 tCO₂/t-ASRとした。

図表 89 環境負荷のインベントリ（ガス化溶融プロセス）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
ガス化溶融工程	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ ASR : 155 (kg) ・ 電力 : 49.6 (kWh) ・ コークス : 26.35 (kg) ・ 石灰石 : 11.6 (kg) ・ LPG : 1.2 (Nm³) ※文献cより 	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 溶融スラグ : 39.8 (kg) ・ 溶融メタル : 20 (kg) ・ 溶融飛灰 : 7 (kg) ・ CO₂ : 201 (kg) <ul style="list-style-type: none"> ➢ プロセスエネルギー由来 : 85 (kg) ➢ ASR由来等 : 192 (kg) ➢ 自家発電によるCO₂削減効果 : -76 (kg) ※文献cより

c) 酒井他(2012)「自動車破碎残渣(ASR)の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント」

(3) 風車製造プロセス（従来方式・本実証方式共通）

図表 90～図表 92に小型風車一台の製造におけるインベントリ示す。なおプログラマティックロジックコントローラーは全体重量の1%以下のため、インベントリに計上していない。

図表 90 環境負荷のインベントリ（風車翼製造）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
エポキシ製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ アセトン 3.7 (kg) ・ フェノール 11.7 (kg) ・ プロピレン 6.8 (kg) ・ 電力 22.6 MJ ※文献dより 	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ エポキシ樹脂 19.7 (kg) ※文献bより
炭素繊維製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ アクリロニトリル 93.7 kg ・ 電力 19,309 MJ ※文献dより 	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 炭素繊維 44.3 (kg) ※文献dより
成形	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ エポキシ樹脂 19.7 (kg) ・ 炭素繊維 44.3 (kg) ・ 電力 832 MJ ※文献eより 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ CFRP 64.0 (kg) ※文献eより

d) J L C A-L C Aデータベース 2015年度 4版

e) Tetsuya Suzuki (2005) "LCA OF LIGHTWEIGHT VEHICLES BY USING CFRP" FOR MASS-PRODUCED VEHICLES"

図表 91 環境負荷のインベントリ（風車軸・風車架台）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
溶接鋼管の製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> 鉄鉱石：1,326 (kg) 石灰石：279 (kg) 石炭：502 (kg) 天然ガス：36.9 (kg) ※文献dより	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> 風車軸：900 (kg) CO2：1,350 (kg)
アルミ地金製造	<ul style="list-style-type: none"> ボーキサイト：796 (kg) 電力：21,698 (MJ) 石灰石：23.87 (kg) 石炭：296 (kg) 天然ガス 57.1 (kg) ※文献dより	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> アルミニウム地金：154 (kg) CO2：1419 (kg) ※文献dより
アルミ鍛造（アルミ板材の製造を参考に算出）	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> アルミニウム地金：154 (kg) 電力：440 (MJ) ※文献dより	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> アルミストラット：150(kg)
モルタル製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ポルトランドセメント 2328 (kg) 砂 1503 (kg) 水 1166 (kg) 電気 22.1 (MJ) 軽油 1.73 (L) ※文献dより	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> コンクリート：5,000 (kg) ※文献dより
土台建築	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> コンクリート 5,000 (kg) 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> 風車架台：5,000 (kg)

d) J L C A-L C Aデータベース 2015年度 4版

図表 92 環境負荷のインベントリ（増速器）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
製鉄・圧延	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> 鉄鉱石：205.8 (kg) 石灰石：40.74 (kg) 石炭：70 (kg) 天然ガス 4.72 (kg) ※文献dより	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> 圧延鋼板：140 (kg) CO2：184.7 (kg) ※文献dより
組立・加工（トルクコンバーターの製造を参考に算出）	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> 圧延鋼板：100(kg) 電力：233 (MJ) 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> デフ機構：100(kg)
ギア・ベアリング製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> 圧延鋼板：40 (kg) 電力：79.86 (kWh) LPG：1.452 (kg) ※文献dより	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ベアリング：40 (kg) CO2：4.356 (kg)

d) J L C A-L C Aデータベース 2015年度 4版

(4) HVユニットをリユースした発電ユニット製造プロセス（本実証方式のみ）

図表 93にHVユニットをリユースした発電ユニット製造におけるインベントリを示す。HVユニットをリユースして発電ユニットを製造するため、本実証方式においては環境負荷が発生しない。

図表 93 環境負荷のインベントリ（HVユニットをリユースした発電ユニット製造）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
組立	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ HVバッテリー：38 (kg) ・ ブローファン：1.3 (kg) ・ インバータ：21 (kg) ・ HVモーター：106 (kg) 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 発電・制御ユニット：166.3 (kg)

(5) 風車発電ユニットの新規製造プロセス（従来方式のみ）

図表 94に風車発電ユニットの新規製造プロセスにおけるインベントリを示す。HVユニットをリユースした場合と同様の仕様の発電ユニットを新規に作成することを想定した。本プロセスは従来実証方式におけるHVユニットをリユースした発電ユニット製造(図表 93)に対応しており、新規に部品を製造するため従来方式では環境負荷が発生する。

図表 94 システムバウンダリ（風車発電ユニットの新規製造）

	投入 (Input)	排出・生産 (Output)
製鉄・圧延	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄鉱石：178 (kg) ・ 石灰石：35 (kg) ・ 石炭：60.6 (kg) ・ 天然ガス 4.08 (kg) ※文献dより 	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 圧延鋼板：121.2 (kg) ・ CO2：160 (kg) ※文献dより
アルミ地金製造	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ ボーキサイト：55.8 (kg) ・ 電力：1521 (MJ) ・ 石灰石：1.64 (kg) ・ 石炭：20.8 (kg) ・ 天然ガス 4 (kg) ※文献dより 	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ アルミニウム：10.8 (kg) ・ CO2：100 (kg) ※文献dより
加工・組立 (オルタネーター製造を参考に算出)	【推計値等】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 圧延鋼板：121.2 (kg) ・ アルミスニウム：10.5 (kg) ・ 樹脂：33.3 (kg) ・ 電力：782 (MJ) 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ バッテリー：38 (kg) ・ インバータ：21 (kg) ・ 発電機：106 (kg)
組立	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ バッテリー：38 (kg) ・ インバータ：21 (kg) ・ 発電機：106 (kg) 	【実証値】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 発電・制御ユニット：166.3 (kg)

d) J L C A-L C Aデータベース 2015年度 4版

4. 環境負荷（CO2排出量）の算出

CO2排出量の算出に際して利用した燃料の発熱量、CO2排出係数などを図表 95 に示す。発熱量、CO2排出係数は、最新の環境省令を使用し、インベントリに計上した投入エネルギーに対して下記の排出係数をかけることで、CO2排出量を算出した。

図表 95 CO2排出量の算出に利用した排出係数

		密度		CO2 排出係数		出展	
			(単位)	消費	(単位)	密度	CO2 (消費)
電力(発電端)	電力平均(日本)	-	-	0.587	kgCO ₂ /kWh		[3]
原油・石油製品類	軽油	0.843	kg/L	2.58	kgCO ₂ /L	[1]	[4]
石炭類	原料炭	-	-	2.61	kgCO ₂ /kg		[4]
天然ガス類	LPG(液化石油ガス)	-	-	3.00	kgCO ₂ /kg		[4]
	天然ガス(除く液化天然ガス:国産)	0.002	kg/L	2.22	kgCO ₂ /m ³	[2]	[4]

[1] 石油通信社「石油資料」

[2] 空気密度=1.2929、高炉ガス比重/空気比重=0.65として算出

[3] 環境省 「電気事業者別のCO2排出係数（平成27年度実績）」

[4] 環境省 「算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧」

(1) HV車の解体・破砕・選別プロセス（従来方式・本実証方式共通）

HV車の解体・破砕・選別プロセスにおけるCO2排出量の算出過程を図表 96 に示す。従来方式においても本実証方式においても、解体・破砕・選別プロセスで処理する対象は同一のため、本項においてCO2排出量の差は生じない。算出したCO2排出量は0.031 t-CO2となる。

図表 96 CO2排出量の算出（解体・破砕・選別）

	①投入エネルギー	②排出原単位	CO2排出量 (① ②)
事前解体工程	電力：53.2 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.0312 (t-CO2)

(2) ガス化溶融プロセス（従来方式・本実証方式共通）

ガス化溶融プロセスにおけるCO2排出量の算出過程を図表 97に示す。従来方式においても本実証方式においても、ガス化溶融プロセスで処理する対象は同一のため、本項においてCO2排出量の差は生じない。算出したCO2排出量は0.19 t-CO2となる。

なおガス化溶融プロセスの環境負荷計算に際しては、ASR中に含まれる炭素由来のCO2も計上することとし、CO2排出量原単位も参考文献(c)に記載の1.24 t-CO2/tを利用した。

図表 97 全CO2排出量の算出（ガス化溶融プロセス）

	① 入量	②排出原単位 ※文献cより	全CO2排出量 (①×②)
ガス化溶融プロセス	ASR : 0.155 (t)	ASR 由来等CO2: 1.24 (t-CO2/t-ASR)	0.192 (t-CO2)
		コークス由来CO2 0.529 (t-CO2/t-ASR)	0.082
		LPG・軽油由来CO2 0.022 (t-CO2/t-ASR)	0.003
		自家発電由来CO2削減: -0.491 (t-CO2/t-ASR)	-0.076
合計	-	-	0.202

c) 酒井他(2012)「自動車破碎残渣(ASR)の資源化・処理に関するライフサイクルアセスメント」

(3) 風車製造プロセス（従来方式・本実証方式共通）

風車製造プロセスにおけるCO2排出量の算出過程を図表 98～図表 100に示す。従来方式においても本実証方式においても、風車翼、風車軸・風車架台、増速器は新規に製造するため、本項においてCO2排出量の差は生じない。それぞれのプロセスにおけるCO2排出量は、風車翼製造：3.29 t-CO2、風車軸・風車架台：5.81 t-CO2、増速器：0.28 t-CO2となる。

図表 98 CO2排出量の算出（風車翼製造）

	①投入エネルギー	②排出原単位	CO2排出量 (①×②)
エポキシ製造	電力：6.28 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.003 (t-CO2)
炭素繊維製造	電力：5363 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	3.148 (t-CO2)
成形	電力：231 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.136 (t-CO2)
合計	-	-	3.287 (t-CO2)

図表 99 CO2 排出量の算出（風車軸・風車架台）

	①投入エネルギー	②排出原単位	CO2排出量 (①×②)
溶接鋼管の製造	石炭：502 (kg)	0.00261 (t-CO2/kg)	1.310 (t-CO2)
	天然ガス：36.9 (kg)	0.00110 (t-CO2/kg)	0.041 (t-CO2)
アルミ地金製造	電力：6027 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	3.538 (t-CO2)
	石炭：296 (kg)	0.00261 (t-CO2/kg)	0.772 (t-CO2)
	天然ガス：57.1 (kg)	0.00110 (t-CO2/kg)	0.063 (t-CO2)
アルミ鍛造	電力：122 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.072 (t-CO2)
モルタル製造	電力：6.1 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.0036 (t-CO2)
	軽油：1.73 L	0.000258 (t-CO2/L)	0.0044 (t-CO2)
合計	-	-	5.805 (t-CO2)

図表 100 CO2排出量の算出（増速器）

	①投入エネルギー	②排出原単位	CO2排出量 (①×②)
製鉄・圧延	石炭：70 (kg)	0.00261 (t-CO2/kg)	0.183 (t-CO2)
	天然ガス：4.72 (kg)	0.00110 (t-CO2/kg)	0.005 (t-CO2)
組立・加工	電力：64.7 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.038 (t-CO2)
ギア・ベアリング製造	電力：79.9 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.047 (t-CO2)
	LPG：1.45 (kg)	0.00300 (t-CO2/kg)	0.004 (t-CO2)
合計	-	-	0.277 (t-CO2)

(4) HVユニットをリユースした発電ユニット製造プロセス（本実証方式のみ）

HVユニットをリユースして発電ユニットを製造するため、本実証方式においては環境負荷が発生しない。

(5) 風車発電ユニットの新規製造プロセス（従来方式のみ）

風車発電ユニット製造プロセスにおけるCO2排出量の算出過程を図表 101に示す。本実証方式ではHVユニットを発電ユニットとしてリユースするため、本プロセスの環境負荷は従来方式にのみ計上される。算出したCO2排出量は0.60 t-CO2となる。

図表 101 CO2排出量の算出（風車発電ユニットの新規製造）

	①投入エネルギー	② 出原単位	CO2排出量 (①×②)
製鉄・圧延	石炭：60.6 (kg)	0.00261 (t-CO2/kg)	0.16 (t-CO2)
	天然ガス：4.08 (kg)	0.00110 (t-CO2/kg)	0.004 (t-CO2)
アルミ地金製造	電力：423 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.25 (t-CO2)
	石炭：20.8 (kg)	0.00261 (t-CO2/kg)	0.05 (t-CO2)
	天然ガス：4 (kg)	0.00110 (t-CO2/kg)	0.004 (t-CO2)
加工・組立	電力：217 (kWh)	0.000587 (t-CO2/kWh)	0.13 (t-CO2)
合計	-	-	0.597 (t-CO2)

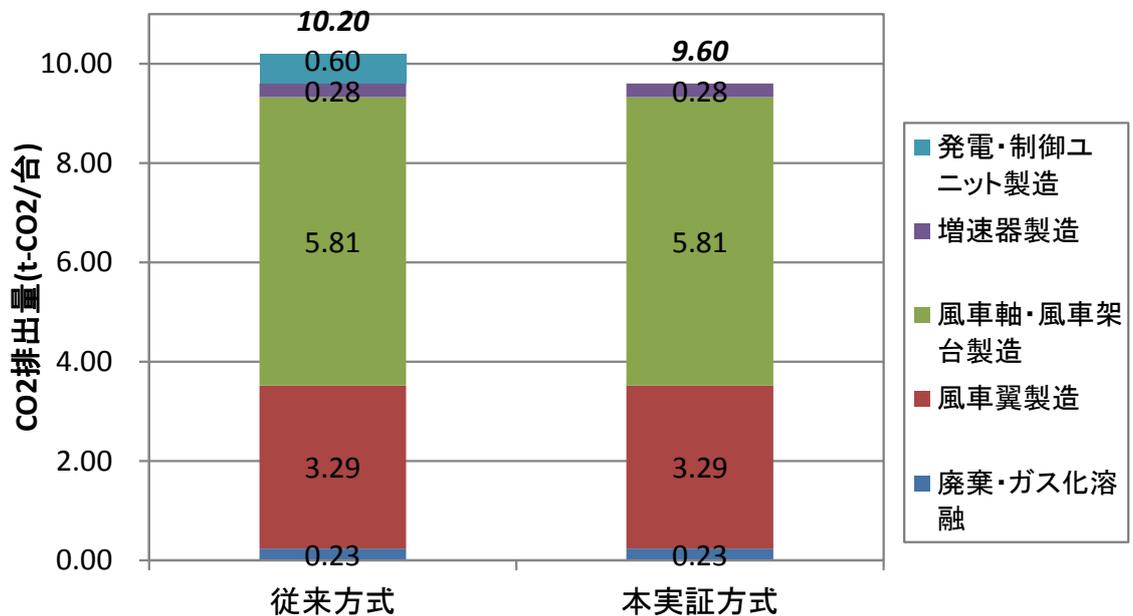
5. 環境負荷（CO2排出量）分析結果

「小型風力発電システム（15 kW）1台の製造」の環境負荷を従来方式と本実証方式で比較すると、従来方式では新規に発電ユニットを製造する必要があるため、リユース部品を利用する本実証方式の方が、CO2排出量(t)は約6%（0.60 t）少なくなる（図表 102、図表 103）。

図表 102 HV車(プリウス) 1台の処分、小型風力発電システム1台の製造による環境負荷
(CO2排出量 (t-CO2/台))

プロセス名	CO2排出量 (t)	
	従来方式	本実証方式
廃棄・ガス化溶解	0.23	0.23
風車翼製造	3.29	3.29
風車軸・風車架台製造	5.81	5.81
増速器製造	0.28	0.28
発電・制御ユニット製造	0.60	0
合計	10.20	9.60

図表 103 HV車(プリウス) 1台の処分、小型風力発電システム1台の製造による環境負荷
(CO2排出量 (t-CO2/台))



VI-2. 天然資源消費量（HVシステムのリユース）

1. 機能単位

本実証においてHVユニットをリユースされることで削減されるバージン資源の量を評価する。機能単位は、CO2排出量を評価した際と同様の「HV車（プリウス）1台の処分、小型風力発電システム1台の製造」とし、評価範囲・バウンダリも図表 79と同様のものを利用する。

2. 天然資源消費量の評価

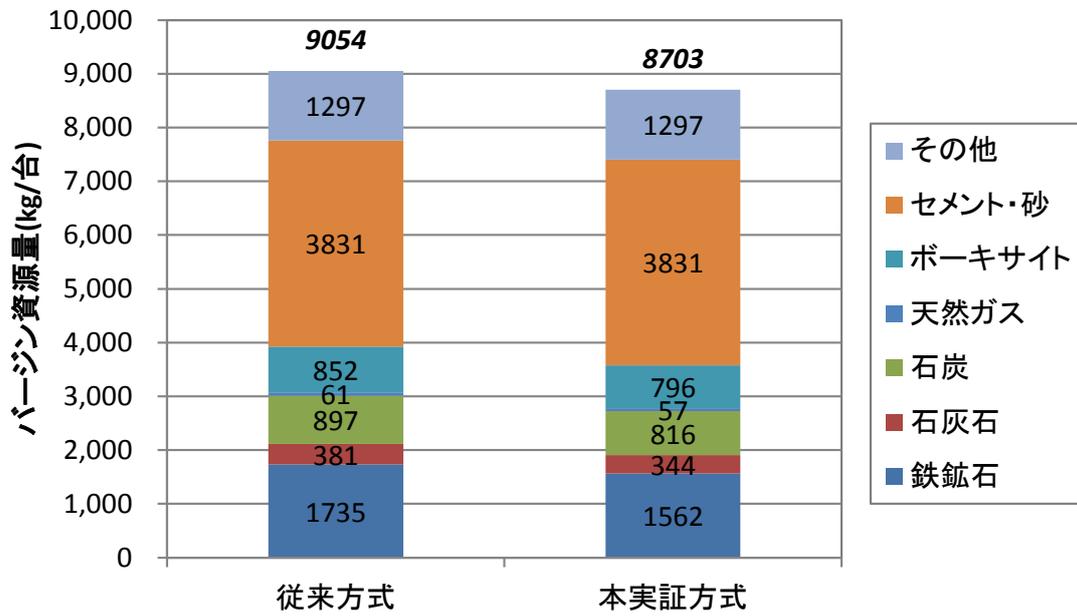
CO2排出量計算時に利用したインベントリデータをもとに、バージン資源の使用量を整理した。なお、最終製品である小型風力発電システムの総重量に占める割合が1%未満の部品については評価範囲の対象外としている。

従来方式と本実証方式で比較すると、本実証方式では新規に発電ユニットを製造する必要がないため、鉄鉱石やボーキサイトといったバージン資源の量が少なくなる。重量で比較すると、本実証方式は従来方式と比べ、バージン資源の必要量が約4%（351kg）少なくなる（図表 104、図表 105）。

図表 104 HV車（プリウス）1台の処分、小型風力発電システム1台の製造におけるバージン資源の使用量（kg/台）

バージン資源種	バージン資源量（kg）	
	従来方式	本実証方式
鉄鉱石	1,735	1,562
石灰石	381	344
石炭	897	816
天然ガス	61	57
ボーキサイト	852	796
コンクリート	3,831	3,831
その他	1297	1297
合計	9,054	8,703

図表 105 HV車(プリウス) 1台の処分、小型風力発電システム1台の製造におけるバー
ジン資源の使用量 (kg/台)



VI-3. その他の環境負荷低減効果

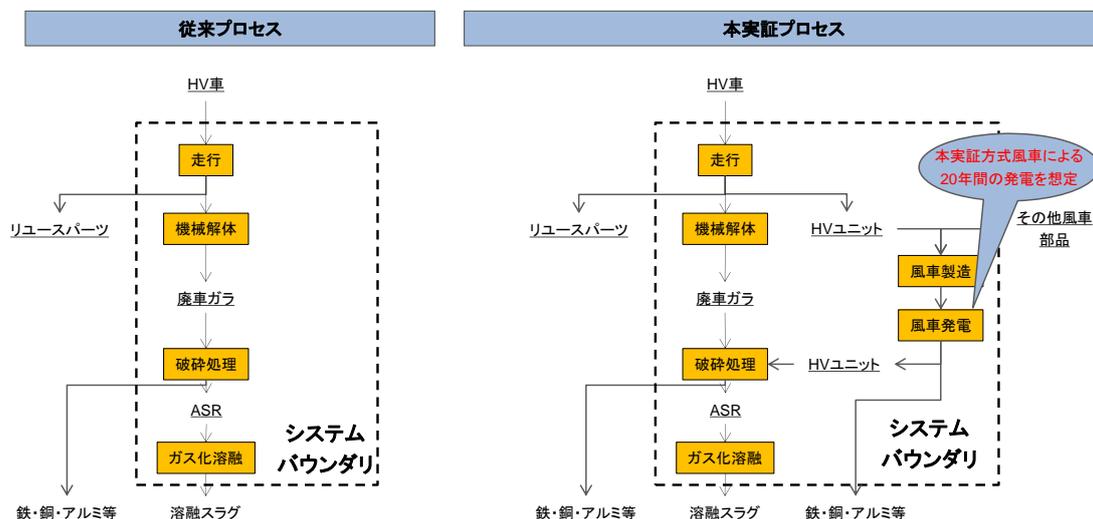
前掲では、HV車(プリウス) 1台の処分プロセスや小型風力発電システムの製造プロセスの違いに注目して評価を行ったが、1台のHV車が「走る」という機能以外に新たな機能を加えて利用できるとした場合、どのような付加価値(エネルギー収支の改善や便益等)をもたらすのかを定量的に評価するため、ここではHV車の利用方法の違い(HV車を自動車としてのみの利用する場合とHV車を自動車及び小型風力発電システムとして利用する場合)に着目して評価することを試みた。

1. エネルギー収支の改善効果 (HV車のライフサイクルでの活用)

(1) 機能単位

機能単位を「1台のHV車(プリウス)のライフサイクルでの活用(走行もしくは部品をリユースすることによる小型風力発電システムとしての発電を含む)」とし、HVユニットを活用した風車による発電プロセスまでもバウンダリに含めて、エネルギー収支の改善効果をCO₂換算で評価した。本実証におけるプロセスの評価範囲と、比較対象とする従来プロセスの評価範囲を図表106に示す。

図表 106 システムバウンダリ (HV車のライフサイクルでの活用)
従来プロセスと本実証プロセス



(注1) 本図で比較対象としているのは、HV車を自動車としてのみ利用する場合(従来プロセス)とHV車を自動車及び小型風力発電システムとして利用する場合(本実証プロセス)である(HV車の処分方法や小型風力発電システムの製造方法の差異を評価しているわけではないことに注意)。

(注2) 小型風車の原料について、最終製品である小型風力発電システムの総重量に占める割合が1%未満の部品については評価対象外としている。

(注3) 小型風車による発電効果(創エネルギー効果)は、マイナスのCO₂排出効果として整理した。この発電量のCO₂換算は、一般電源の排出係数を用いた(発電期間は20年間、排出係数は平成27年度環境省令である0.000587 tCO₂/kwh)。

(2) インベントリ算定項目

投入関係では、処理対象物（HV車）、小型風車原料、電力、各種燃料（ガソリン、軽油、重油、一般炭など）などを対象とした。排出関係では、被処理物（シュレッダー後のスクラップ、ASR等）、CO2及び廃棄物（スラグなど）を対象とした。

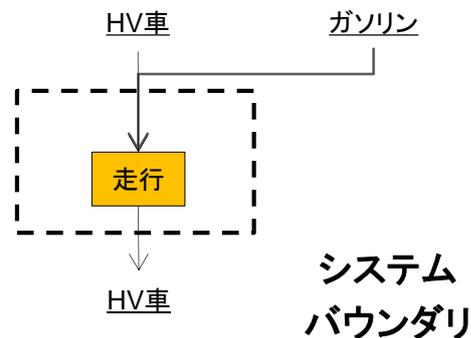
(3) バウンダリ（分析境界）

図表 106に示したシステムバウンダリの、個別プロセスの詳細を以下に示す（VI-1で想定するシステムバウンダリと共通する部分が多いため、” VI-1 1. 機能単位” で詳述したプロセスは省略し、図表 106で新たに考慮するプロセスのみを記載する。）

①HV車の走行プロセス

図表 107に走行プロセスにおける環境負荷分析のシステムバウンダリを示す。プリウス一台が廃車されるまでの走行を想定し、走行距離は10万kmとした。

図表 107 システムバウンダリ（走行）



②本実証方式の風車による発電プロセス

本実証方式の小型風力発電システムによる1 kWhの発電とした。発電期間は20年間を想定した。

(4) インベントリデータ算定の考え方

インベントリデータ算定の考え方を以下に示す。VI-1で想定するシステムバウンダリと共通する部分が多いため、” VI-1 2. インベントリ算定項目” で詳述したインベントリデータは省略し、図表 106で新たに考慮するインベントリデータのみを記載する（VI-1において評価されたCO2排出量には一部非エネルギー起源のCO2を含むため、それらを除いたものをエネルギー収支（CO2換算）評価のためのインベントリデータとして活用した）。

① HV車の走行プロセス（共通）

図表 108に走行プロセスのインベントリを示す。投入（Input）と排出・生産（Output）を記述している。データは文献値で得られたもの、及びカタログスペック等を用いている。

図表 108 環境負荷のインベントリ（走行）

	投入（Input）	排出・生産（Output）
走行	<p>【文献値からの推計】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ HV車：1,250 (kg/台) ※2世代プリウスのカタログ値 ・ ガソリン 2817 L(燃費をカタログ値 35.5 km/Lと想定) 	<p>【文献値等からの推計】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ HV廃車：1,250 (kg/台) ・ CO2 6,540 (kg)

② 本実証方式の風車による発電量と既存風車による発電量との差分

風車発電によるCO2排出量削減効果の評価するため、本実証方式の風車による発電量と既存風車による発電量との差分を創エネルギー効果として本実証方式のエネルギー収支に計上した。発電量の差分に一般電源の排出係数をかけたものを環境負荷削減効果として算出する。発電期間は20年間とし、排出係数は平成27年度環境省令である0.000587 tCO2/kWhとする。

（5）エネルギー収支分析結果

「1台のHV車（プリウス）のライフサイクルでの活用」のエネルギー収支を従来方式（HV車を自動車としてのみ利用する場合）と本実証方式（HV車を自動車及び小型風力発電システムとして利用する場合）で比較すると、本実証方式では年間約5,000 kWhの創エネルギー効果（CO2換算で5000 kWh/年×20年×0.000587¹＝58.7 t-CO2/台・20年）が得られる。HV車の走行、廃棄・ガス化溶融、風車製造に係るエネルギー消費までを含めて考えるても、最終的にエネルギー収支（CO2換算）で、ライフサイクル（20年）として42.75 t-CO2/台・20年（年間2.1375 t-CO2/台）相当の削減効果がある（図表 109、図表 110）。

¹平成27年度の排出係数は、0.000587 (t-CO2/kWh) （H28年12月27日環境省公表）。

図表 109 1台のHV車のライフサイクル（20年）でのエネルギー収支
（CO2排出量（t-CO2/台・20年）換算の消費・発生エネルギー）

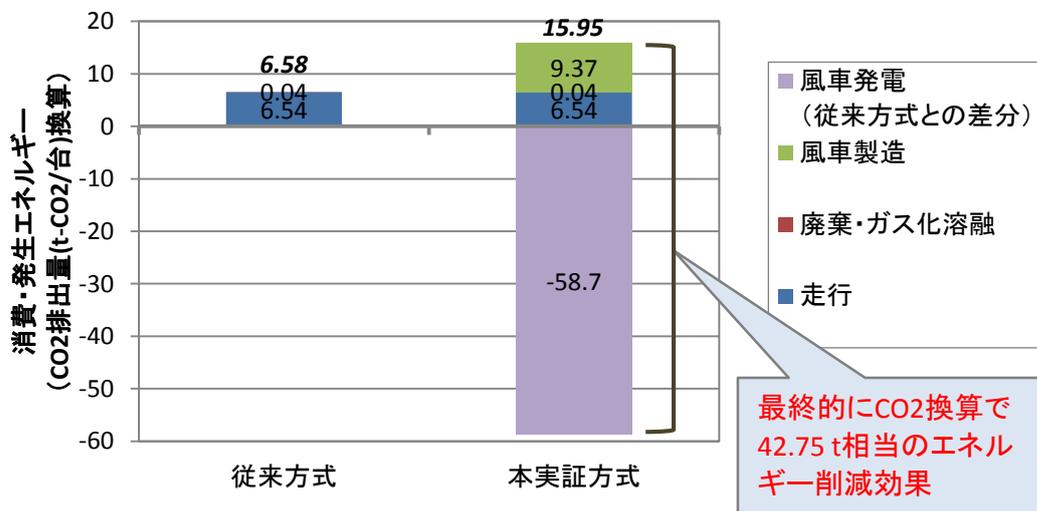
プロセス名	エネルギー収支（CO2排出量（t-CO2/台・20年）換算）	
	従来方式	本実証方式
走行（注1）	6.54	6.54
廃棄・ガス化溶融（注2）	0.04	0.04
風車製造（注3）	-	9.37
風車発電	-	-58.7
合計	6.58	-42.75

注1：ガソリン利用量 2817 L×排出原単位 0.00232 t-CO2/L =6.54 t-CO2

注2：廃棄は図表 96と同様、ガス化溶融については図表 97のうちASR由来のCO2を差し引いたもの

注3：図表 102における風車翼製造、風車軸・風车架台製造、増速器製造の合計値と同様

図表 110 1台のHV車のライフサイクル（20年）でのエネルギー収支
（CO2排出量（t-CO2/台・20年）換算の消費・発生エネルギー）



2. 発電に伴う便益拡大効果

(1) 機能単位

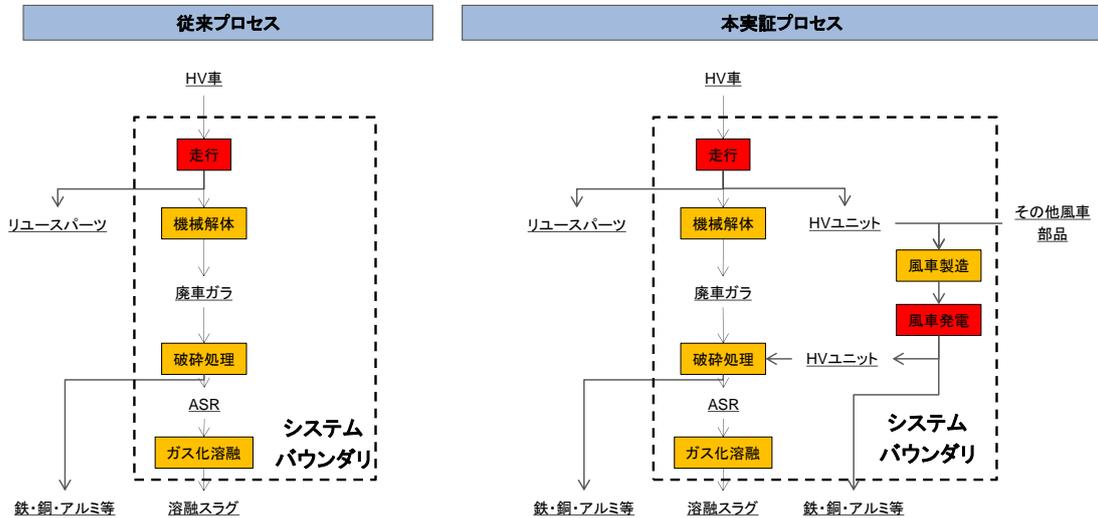
本実証では、HV車の利用度を高度化させることにより、これに用いられた資源から得られる便益を最大化させること（資源効率の向上）を目指している。これを踏まえ、機能単位を「HV車1台がもたらす便益」とし、従来プロセスと本実証プロセスを便益で比較する。具体的には、小型風力発電事業を実施することで、どの程度便益が増加するかを簡易的に計算する。

便益の算定方法については、国土交通省が採用している走行時間減少便益や走行経費削減便益の考え方²を参考とし、HV車の利用によって得られる便益は、その自動車を購入し、また維持等するために要する費用に等しいとした。本実証に

² 国土交通省「費用便益分析マニュアル」（2008年）

におけるプロセスの評価範囲と、比較対象とする従来プロセスの評価範囲を図表111に示す。

図表 111 システムバウンダリ（従来プロセスと本実証プロセス）



（２）便益の算定方法

①HV車に係る便益

HV車の利用によって得られる便益は、先述の考え方を参考とし、HV車の調達費用、燃料費、維持費の合計に等しいとみなした。

図表 112 1台のHV車に係る費用（円／台）

品目	費用
自動車本体価格(注1)	2,500,000
燃料費(注2)	418,606
管理維持費(注3)	609,840
合計	3,528,446

注1：2世代プリウスの新車販売価格

注2：ガソリン利用量 2817 L×ガソリン単価 148.6円/L³=418,606円

注3：利用期間12年⁴×管理維持費50,820 円/年⁵=508,200円

② 風力発電に係る便益

風力発電による便益を、風力発電事業により得られる売電収入として計算した。売電価格はFIT価格を利用した。

³ 資源エネルギー庁「石油製品価格調査」2015年ガソリン価格全国実績の平均値

⁴ 自動車検査登録情報協会「我が国の自動車保有動向」車種別の平均使用年数推移2015年実績

⁵ 総務省統計局「家計消費状況調査」2015年世帯当たりの年間自動車整備費

(3) 便益の算定

図表 113に1台のHV車の便益の計算結果を示す。小型風力発電システムとして再利用することで約22,000,000円の新たな付加価値を創出しており、そのまま廃棄する従来方式と比べて便益が約7倍程度になった。

図表 113 1台のHV車の便益 (円/台)

	従来方式	本実証方式 (目標ケース)
HV車に係る便益(注1)	3,528,446	3,528,446
風車発電に係る便益(注2)	-	22,000,000
合計	3,528,446	25,528,446

注1：HV車の価格、燃料費、維持費といった費用と便益が同等であると仮定

注2：売電価格をFit小型風車の55円/kWhと想定

目標ケースにおいては年間発電量20,000 kWh/年×20年×55円/kWh=22,000,000円

VII. 事業実現可能性等

VII-1. 技術的実現性

1. HV車からの部品回収による小型風力発電システムの生産

HV車から主要部品を回収し、それを小型風力発電システムの構築にリユースする事業では、回収作業の生産性、回収部品の品質確保、小型風力発電システム向けの性能確認などが、技術的な視点からみた実現性評価のポイントとなる。

図表 114にて実際に本事業で回収対象とした2世代プリウスが、何台どのような状態でHV廃車として発生しているかを示している。図表 114中の年式平均とは、オークションで取引された2世代プリウスが生産された平成年度の平均を表している。同じく図表 114中の距離平均とは、オークションで取引された2世代プリウスの平均走行距離である。本実証で試験をした2世代プリウス（図表 9）は、年式平均が平成17年7月、距離平均が17.7万kmであった。これより、今回実証で試験した状態とほぼ同じ条件でHV廃車が入手可能であることが判明する。廃車は発生するもので意図的に生産されるものではないため、回収対象の入手可能性が担保される事が、事業実現可能性評価では第一となる。

図表 114 2世代プリウスオークション情報（2016年4月-9月累計）

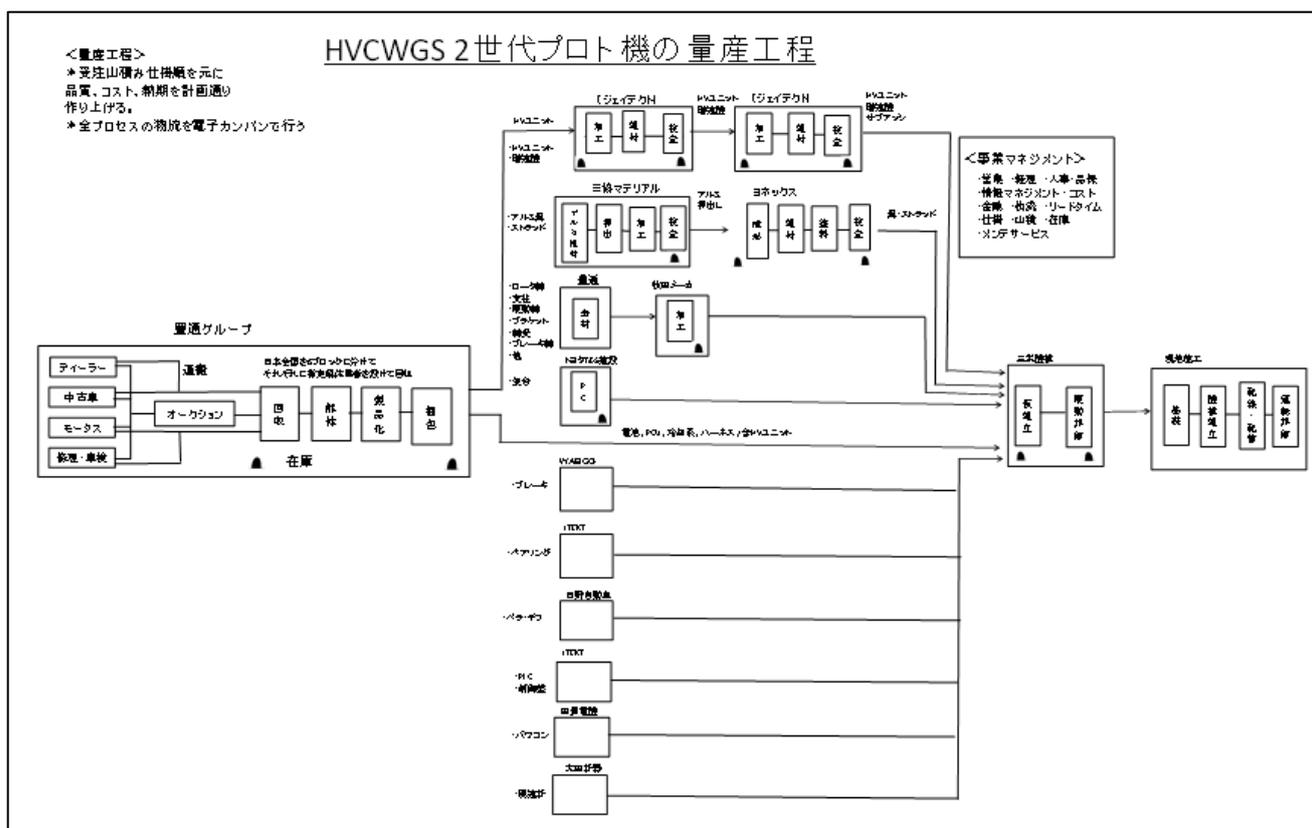
	合計台数(台)	年式平均(年)	距離平均(万km)	応札額平均(万円)
札幌	199	18	16.2	25.4
東北	128	18	16.7	24.8
群馬	143	18	14.3	25.9
東京	934	18	13.5	28.6
埼玉	89	18	12.1	27.3
横浜	316	18	12.4	28.7
新潟	41	18	15.5	27.6
北陸	33	22	16.9	24.6
静岡	144	18	12.9	26.6
名古屋	623	19	11.6	32.4
R名古屋	134	17	16.4	22.9
大阪	151	18	15.0	26.0
神戸	39	18	14.6	27.3
岡山	70	18	20.6	24.7
福岡	71	18	16.5	27.0
九州	300	18	16.6	26.6
平均	213	18	15.1	26.7
合計	3415			

発生品であるHV廃車が確実に入手可能であれば、本実証試験を繰り返す事、性能試験のN数を増やす事で、日本国内でのHVユニット回収の仕組みは、マニュアルに沿って、技術的にも経済的にも成立する事は確認済みである。

今後は、さらなる回収（リユース）対象品の拡大と2世代プリウス廃車発生が多い米・英での回収スキームの構築が必要である。また、回収品の性能検査機能についても強化していくことが今後の課題となる。

さらに、今回の回収実証試験の結果（回収時間や回収に要する設備、技能）と回収後の検品、改造後の作動試験等の結果（歩留まり、性能評価等）を踏まえ、事業化した際に量産レベル毎の技術的な課題について精査して行く必要がある。具体的には、技能工や設備の確保、工程の作り込み等の課題に対処していかねばならない。下図にて量産工程のイメージ図（図表 115）を示すが、今後これをより具現化して行く必要がある。

図表 115 量産工程イメージ図



2. 小型風力発電システムによる発電

実際にHV車からの回収部品を用いて製作した発電システムが様々な風況下にあっても一定以上の発電性能を発揮できるかどうか、また一定期間、破損したりせずに発電能力を維持し続ける耐久性があるかどうか、もし故障した時でも迅速に対応して保守サービスができるかどうか、技術的な視点からみた実現性評価のポイントとなる。

HVユニット（インバータ、モーター、バッテリー）、CVJ、デフ、ブレーキ、いずれも適切なソフト的・メカ的な仕様変更を行い、単品ではなく、システムとしてリユースする事により、性能の高いコスト競争力のある部品として、小型風力発電システムに利用できる事が実証された。品質のバラツキについても懸念がない事が検証された。

さらに今回、リユース品+車載用部品を使って設計された風車の発電性能を実際の風況データでシミュレーション解析（目標の発電出力が出ているかどうか）した他、設計された風車の安全性（信頼性）を荷重解析（国際風車設計基準IECの要件を満たしているか）することで、技術的信頼性を再確認した。

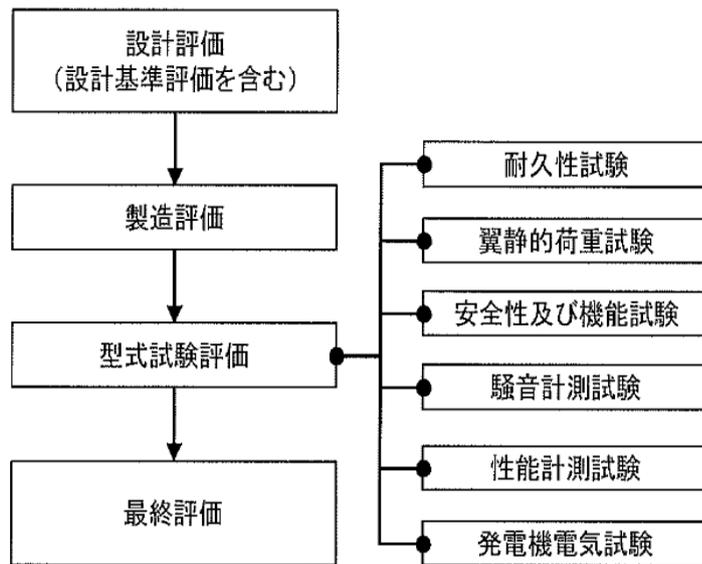
保守・メンテサービスにおいては、基本、自動車の部品交換を想定して体制整備をする事が可能と考える。昨今、自動車市場でも中古部品の普及が進んでおり、各地方の自動車ディーラー店、又は、サービス・整備工場、解体工場等と連携して、風車の定期点検を実施、不具合発生の場合は、予備の回収品と交換する作業は、通常自動車を扱っている場合と基本同じであり、技術的な問題はないと思われる。

事業化へ向けては、前項1の回収同様に、量産レベル毎に今回単品で行った各部品の仕様変更を、量産を想定してその工程を確立する必要がある。その際に発生する技術的課題（工程毎のばらつき管理）について対処して行く必要がある。

尚、今回はユニット毎にその性能を評価したが、実証機を設置し、風車全体システムとしての有効性を今後は総合的に評価する必要がある。

又、実際に事業化する際には、図表 116に沿って、一般財団法人「日本海事協会」において小型風車型式認証を取得す必要がある。

図表 116 小型風車型式認証プロセス



今回の実証では、上記認証試験相当の試験を行い国際風車設計基準にて評価しているため、正式な認証取得へのハードルは高くないと考察する。

VII-2. 経済的実現性

1. コスト

VII-1で示した「2世代プリウスオークション情報」（図表 114）からも回収対象車が想定した価格にて相当数市場で売却されており、回収事業の経済的実現性を裏付けている。

又、V項で評価した経済性の前提となっている事業開始時目標コスト達成に向けて全ての部品において量産前提の参考価格を入手（例：図表 117参照）しており部品コスト積算により目標に近づいている。今後さらに、SE活動を通じてのコスト削減により目標を達成する事により、事業化の実現性は十分であると判断している。

なお、SE活動とは、サイマルテイニアス・エンジニアリング、つまりトヨタ生産方式に沿って、量産工程の作り込みの際に、設計から製造工程まで一貫して無駄をなくすための検討方法である。

図表 117 風車の主要部品であるCFRP製風車ブレード(翼)の見積もり

お見積金額		税率	消費税額	
		8%		
品名	数量	単価	金額(税抜)	適用
1 風車ブレード量産(汎用塗料)	1	141,400	141,400	月産200枚×3年継続
2				
3 風車ブレードサンプル(汎用塗料)	1	222,000	222,000	サンプル数量
4				
5				
6 風車ブレード量産(windhullo)	1	154,000	154,000	月産200枚×3年継続
7				
8 風車ブレードサンプル(windhullo)	1	234,600	234,600	サンプル数量
9				

2. 性能

HVユニットをリユースして製作した小型風力発電システムの性能について本事業において、次の3つの側面から評価した。

- 1・翼の形状と受風面積から理論的に計算される無負荷状態での発電量＝年間平均風速5m/sで28,000/kWh（損出なし）
- 2・プロト機から実測した発電データをモデル化し、シミュレーションをした発電量＝風速5m/sで20,000/kWh
- 3・同じモデルで、JRから提供を受けた風速実測値を使ったシミュレーションによる発電量＝風速4.54m/sで18,797/kWh

この評価結果より、今回V章で経済性評価をした風速5m/sで20,000/kWhの性能は、十分実現可能であり、性能面で事業化の実現性に影響が出る可能性は低いと考えられる。特に、理論値28,000/kWhとシミュレーション値20,000/kWhの差が伝達率（風車のメカ・ソフトによる損出）となるが、現在は、71%であり、未だ改善の余地があり更に性能が向上する可能性が十分も残されていると考察する。

もちろん、シミュレーション上のみでなく、実機にて実証し、評価精度を確実にしていく事も今後の課題である。

VII-3. 環境適合性

本実証では、プロト機と同タイプの風車を使用した実測による実証評価を行った。現状小型風力発電システムとして発する騒音についてはJIS規格に基づく評価を行い、問題がないことを確認しているが、風力発電システムに関して昨今問題視さ

れている要素を考慮すると、今後は低周波音、電波障害、光害、景観への影響といった事項についても順次考慮していくことが必要である。

さらに、風車部品としてリユースした後のリサイクルの仕組みについて、①風車部品として再度リユース②金属を回収するマテリアルリサイクルと結合した場合の経済性や環境負荷低減評価も今後の課題である。

又、次の通り、大型風車と小型風車（20/kW以下）との比較も行ってみた。大型と比較すると小型の環境適合性がさらに明確になる事が分かった(図表 118)。

図表 118 大型風車と小型風車比較

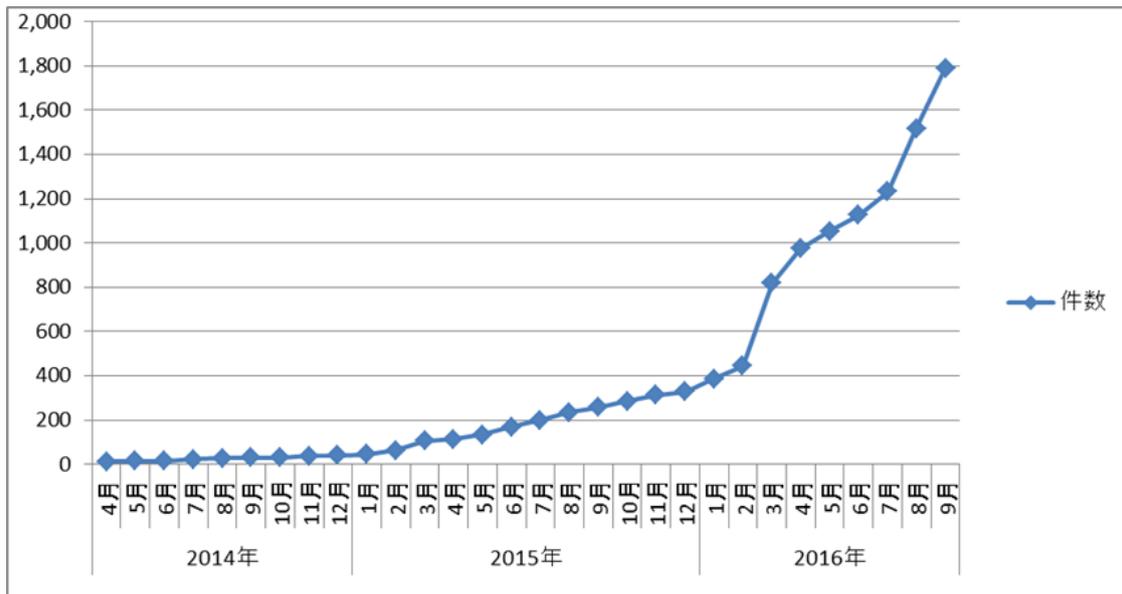
大型風力		小型風力	
×	山間部は輸送路に制限	○	既存の道路を活用
×	送電線の敷設が必要	○	既存の送電線に連系
×	騒音問題 がある	△	騒音問題は軽微
×	バードストライクがある	○	バードストライクの確立は低い
×	環境影響調査が必要	○	不要(7,500kW以下)
×	輸送時に交通への影響大	○	影響なし
×	景観への影響がある	△	影響は軽微
×	電波障害の可能性ある	○	可能性なし
×	環境影響調査に時間がかかる(3~4年)	○	不要(7,500kW以下)
×	許認可取得に時間がかかる(1~2年)	△	時間はかからない(1~6カ月)

VII-4. 回収対象の発生量と市場規模の妥当性

VII-1で現在実際に発生している2世代プリウスの台数を示した。これによると毎月平均約570台（3415台÷6カ月）がオークションで売却されている。これは、全国展開しているオークション業界大手の（株）USSからの情報であるが、他のオークションでの売買やそもそもオークションに出ない多走行車、事故車、ディーラー扱い車等を含めると月1,000台近い回収対象車はありと想定され、事業化に向けて量産する場合としてV章の最後で示した月50~100台（図表 77）の回収は十分可能であると判断できる。

又、図表 119にて、再生可能エネルギーの中で普及が遅れていた小型風車も2015年より大幅に増加しており、市場規模も拡大している事が窺われる。特に、2016年後半からは、月200台のペースとなっている。

図表 119 小型風車設備設置累積件数



大型風車は規模の経済性では、圧倒的に優位であるが、VII-3で示した通り近年環境への影響が問題になっており、FIT価格も太陽光と同様に下落している。

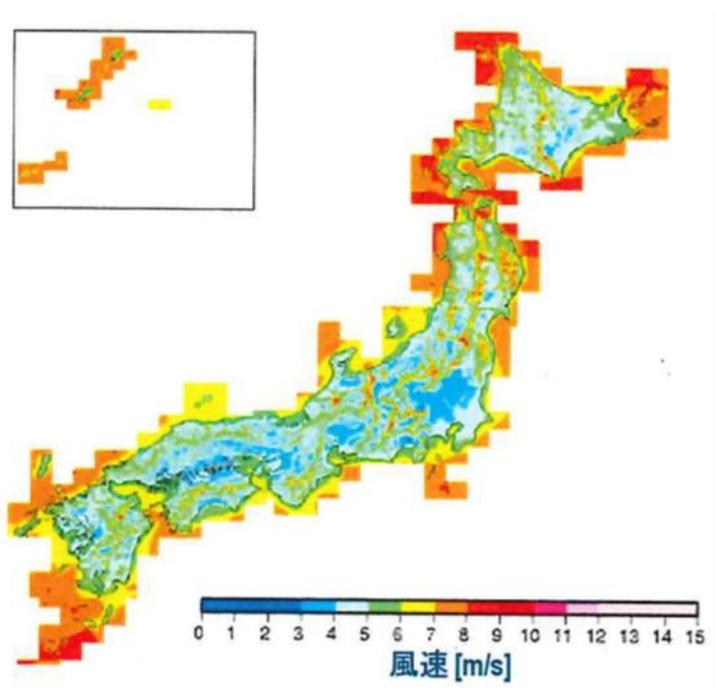
図表 120に示す通り、今回経済性評価した風速5m/s以上の風況地は、日本にはまだまだ多くあり、上記環境問題、地形、投資額の大きさ等により大型風車の設置を困難にしてきた土地にも小型風車が今後そのコストパフォーマンスさえ担保されれば、潜在的に多数設置される余地は十分であると判断できる。

具体的には、JRより今回実際にシミュレーションを行った秋田県羽越本線沿いの「道川4号林」や隣の「道川3号林」だけでも合計で長さ1700mに候補地が及んでおり、本事業で実証した小型風車が約85台程度設置可能である。

JRでは、営業域内に900カ所以上の風速観測点を設けており、上記のような候補地が、秋田県だけでも13カ所ある。

以上より、事業化に向けて、量産体制となった場合での回収対象と市場規模とは整合性があり、事業実現可能性は十分であると判断できる。

図表 120 日本風況マップ



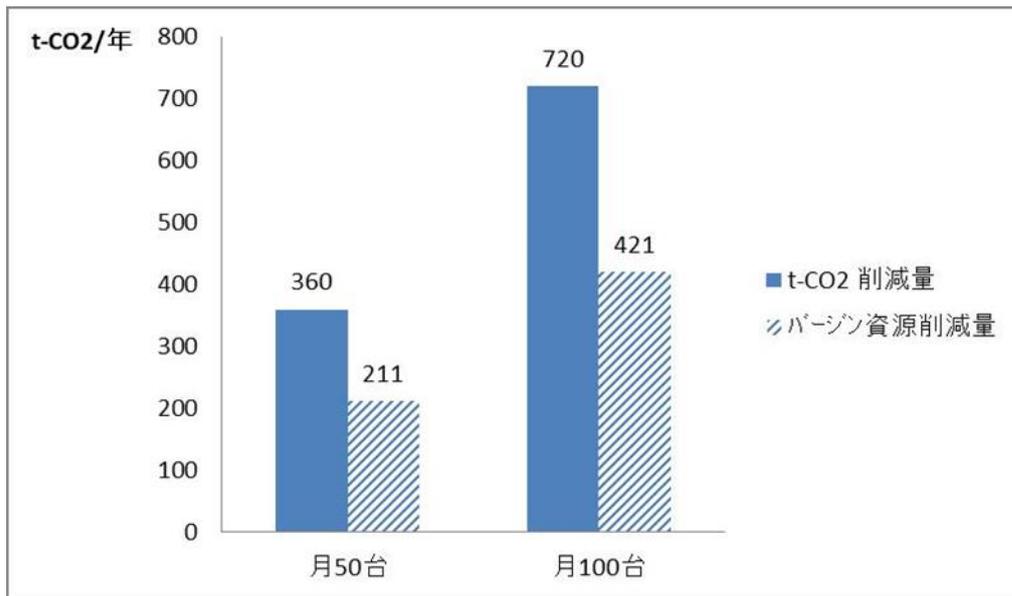
VII-5. 量産化した場合の事業全体での環境負荷低減効果

VII-4で事業化した場合の回収対象と市場規模の妥当性について検証したことを踏まえて量産化時①月50台、②月100台の2つのケースにてVIで検証した環境負荷低減効果を直接効果（図表 121）と間接（波及）効果（図表 122）それぞれ事業規模全体、累積にて評価を実施した。

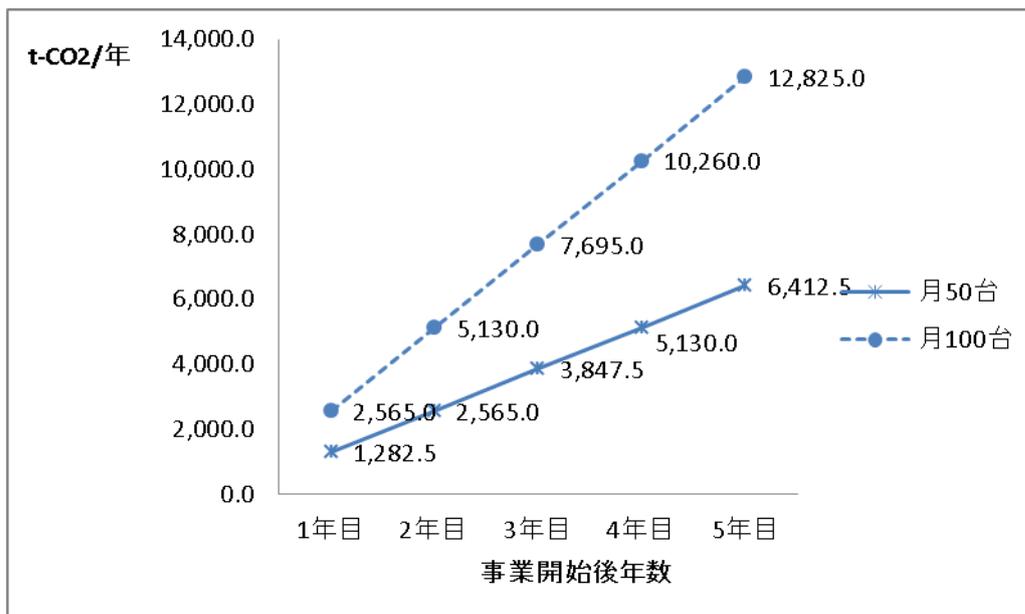
直接効果については、VI-1 図表 102及びIV-2 図表 104で示した、1台あたりの削減効果をもとに上記月間台数から年間へ換算した。（例：t-CO₂削減量②月100台の場合… $0.60 \times 100 \times 12 = 720$ ）

間接効果については、VI-3 図表 109で示した、1台あたりの効果をもとにやはり①、②とも年間換算し、さらにその累積とした。（例：②月100台の場合の1年目… $42.75 \div 20 \times 100 \times 12 = 2,565$ ）

図表 121 直接効果



図表 122 間接（波及）効果



上記2表（図表 121, 図表 122）より、高い環境負荷低減効果が期待できる事が判明した。特に波及効果については、風車は、一旦設置すると約20年運転を継続するため累積での削減効果が期待される事になる。

尚、この波及効果が表れる定性的な評価を次の通り考察した。

A. 制御の特性に起因

- ① HV 制御システムを活用して風車回転数を制御し、最大の出力を得る

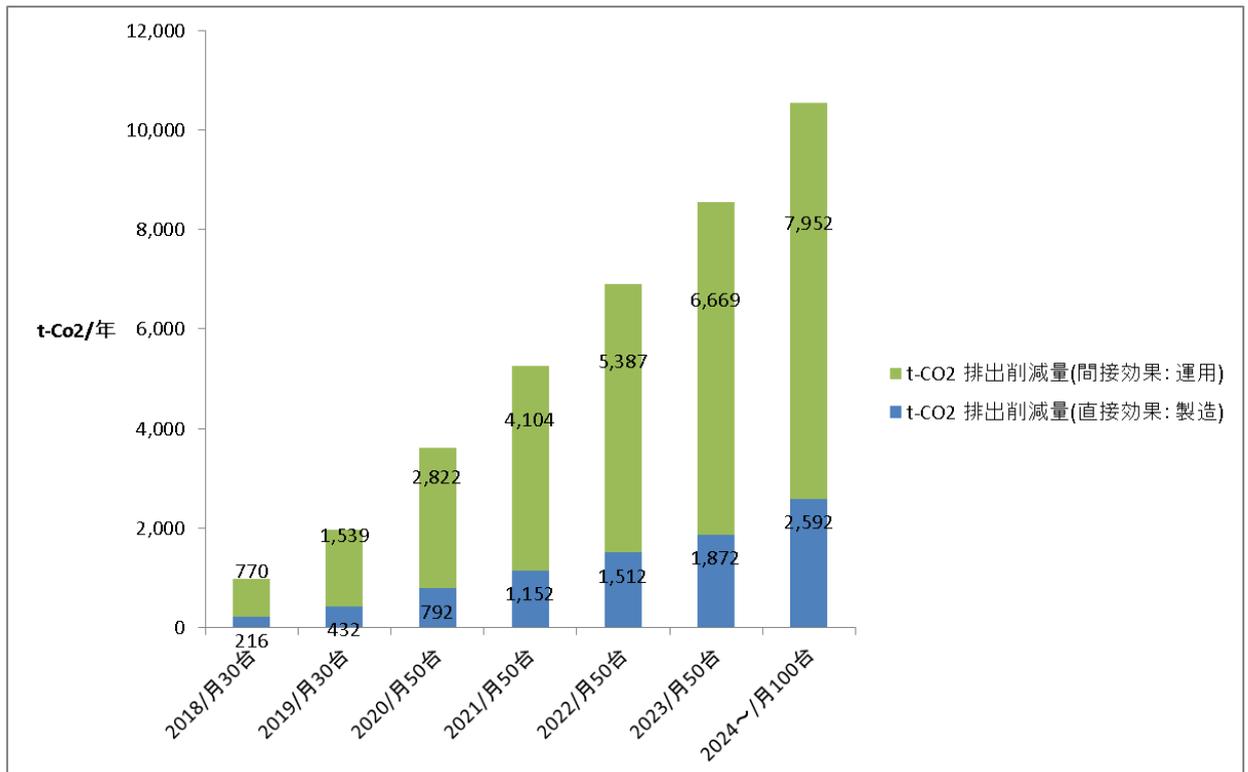
- ② バッテリーを利用して、低風速時でも起動が可能になる
- ③ メカブレーキを利用して、風車の稼働率を向上させ、停止、再稼働時の出力ロスを抑制する

B. 風車の特性に起因

- ① 垂直型である事から 360 度どの方向からの風にも対応
- ② 駆動部が全て一体で下部架台内に収まっているためメンテナンス・保守効率が良く、点検等による稼働率低下へ歯止め

最後に直接、間接効果を図表 123 にて合算し、V 章で行った量産目標 (図表 77) に沿って、今後の環境負荷低減効果をまとめてみた。

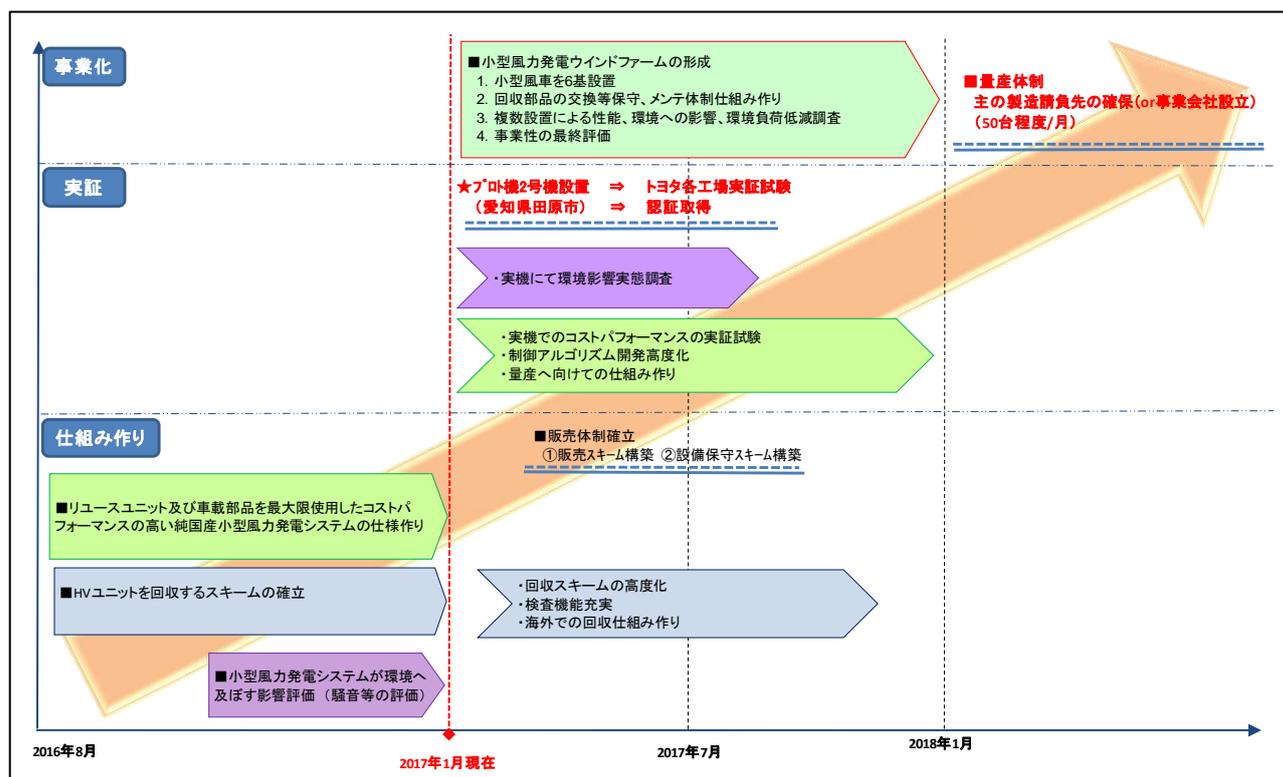
図表 123 環境負荷低減効果まとめ



VIII. 今後の見通し

限定されたケーススタディの範囲ではあるが、本実証を踏まえてHVシステムをリユースして製作された小型風力発電システムは、技術的にも経済的にも十分に実現性の高いものであることが確認した。小型風車を用いた発電事業は、高いFIT価格が設定されており、市場としてのポテンシャルも大きいことから、今後は以下に示すような事業化ステップを踏みながら、実際の導入拡大を目指していく(図表 124)。

図表 124 事業化に向けたステップ



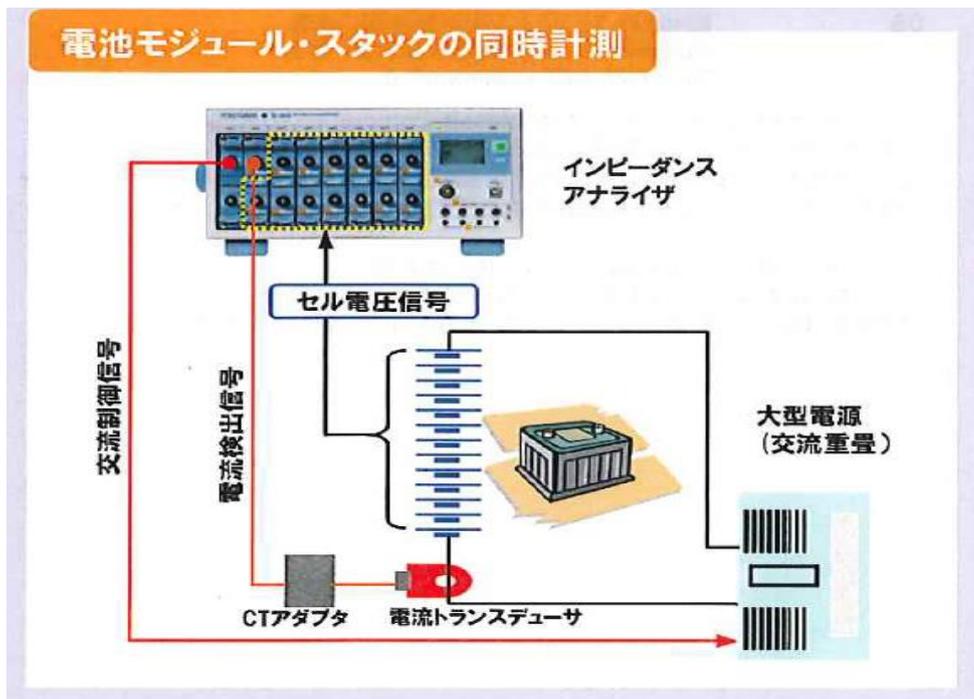
VIII-1. 回収事業の高度化

本事業において15部品について回収する仕組む作りができたが、リユース対象品を拡大する事により回収事業の高度化を図る。具体的には、風車のエアブレーキに使うコンプレッサー（現在は市販のものを使用）を回収品で、さらに12V鉛バッテリーを風車の非常電源として、車載に着いている各種センサー類（振動、熱、温度等）のリユース等対象品を増やしていきたい。

VIII-2. 回収品への検査機能強化

上記回収品の増加に伴い、検査機能も強化したい。特にバッテリーの特性評価をする仕組み作りに着手したい。バッテリーはHVユニットの中でも一番繊細で、評価が難しいため、専用のインピーダンス（抵抗値）測定装置を中心としたシステム化が必要（図表 125参照）である。

図表 125 仮想バッテリーの抵抗測定システム



VIII-3. 海外での回収スキーム確立

2世代プリウスは、米、英、独、仏でも合計で50万台近く販売されており、各国の中古車ネットオークションで調査した結果、日本と同じ程度の価格で取引されている事は本事業中に確認しており、十分に回収の対象となると思われる。今回日本で使用した「回収マニュアル」は英訳済みのため、先ずは、米のLKQ社・英のSilver Lake社といった有力解体業者において回収の実証を行うことを検討している。

VIII-4. 小型風力発電システムの実機での実証試験

本実証事業にて「仕組み作り」を行った「小型風車」を実際にプロト機を製作して運転し、発電量等の性能評価、実際に費やした経費を基にコスト試算を行い、経済性評価の精度を上げ、さらにプロト機による騒音等の環境影響評価も実施する。

VIII-5. 量産体制の確立

事業化へ向けて、量産体制を整備していく。同時に量産時を想定したSE活動を強化して、さらなるコスト削減を図りたい。

VIII-6. ビジネスプランの企画・立案

量産によって小型ウィンドファームを形成し、そこで発電事業をした場合のウィンドファームを経営するビジネスモデルについて初期仮説を複数イメージしてそれぞれの検証を行う。図表 126はその一例であり、今後さらにブラッシュアップを図っていく。

図表 126 初期ビジネスモデル仮説検証



VIII-7. 海外市場調査

図表 127でも示されている通り、小型風車は過去・現在とも海外でより普及しており将来の市場ポテンシャルも高い。

図表 127 主要国での小型風車（SWT）市場

市場の規模・成長性

SWT市場規模 成長のドライバー

	風況	政策・支援制度	電源整備
 中国 812 → 約900	> 内モンゴル・河北地方を中心に良好	> FITは今後引上げの可能性有り > オングリッド型需要を促す政策や成長計画も存在 > 平均出力は微増するも、依然オフグリッド型の低出力機が中心	> 電源未整備地域多数 > オフグリッド需要は今後も堅調推移
 アメリカ 700 → 約1,500	> 中央平原やグレートプレーンズを中心に良好	> FIT等、SWT優遇の動きは拡大濃厚 > 税制優遇や金融プログラム整備と合わせて購入者の裾野拡大 > 上記を受け、オングリッド型SWT需要が増加し、市場拡大	> 電源整備率は高い > オフグリッド需要は相対的に低下
 イギリス 903 → 約2,400	> 極めて良好。ほぼ全土がSWTによる発電に適する	> FIT引下の動きはあるも、依然高水準の価格 > むしろ低出力機種優遇撤廃により、SWTにとって追い風に > 今後、風車大型化が顕著	> 電源整備率は高い > オフグリッド需要は相対的に低下
 ドイツ 100 → 約200	> 北部を中心に風況は良好 > 南部への集中もあり、北部への設置余地高	> FIT価格は低い、電気代高騰と相まって自給需要が激増 > 送電網発達もあり、オフグリッドではなく余剰電力売電が主流に > 高出力機の導入増加	> 電源整備率は高い > オフグリッド需要は僅少

上記主要国以外でも電源が未整備で風況が良い、モンゴルやアルゼンチン等でも小型風車の普及チャンスは十分あると思われ、ターゲットを絞って調査を実施する。特に、モンゴル等は、JCMとも関連した評価も必要と考える。

VIII-8. リユースモデルの拡大

最後に本事業で実証した、「2世代プリウスのHVユニットをリユースした小型風力発電システム」の更なる展開の可能性について考察したい。

今回の新規性は、何よりも、単品ではなく複数の部品をユニットとしてリユースしている事で、しかも、車両制御という極めて高度で性能の良い技術を安価で他製品に応用している事でもある。

この仕組みは、他のHV車でももちろん有効であり、リユース先についても今回のような風力発電だけではなく、基本全ての駆動系製品、例えば、工作機械、産業車両、ロボット、特殊車両、AGV、業務用エアコン、エレベーター等候補は、いくらでもある。又、今回のようにモーターを発電機として使う応用としては、小型「水力」発電システム等があり、このように、風力よりも市場規模は小さいが、技術的なハードルが低い分野もある。

しかも、例えばプリウスだけ見ても今回対象の2世代から3世代、4世代とモーターが進化しており、小型化、高出力化、高効率化しているため、今後より性能の高

いHVユニットが回収対象となるため、リユースした際の品質も同じように高まり、信頼性が高い駆動部品として生まれ変わる事になる。

PHV車やEV車のユニットについても構成部品は、永久に、モーター、インバータ、バッテリーであり、ユニットとしてのリユースの仕組みは不変である。

更に、バッテリーについては、プリウスは、ニッケル水素系のためリサイクルしてもニッケルの回収が可能である。しかし、今後リチウム系になって行くに従って、リサイクルの経済性が著しく低下（基本廃棄物処理）するため、より今回のようなリユース、リビルトのニーズが高まる事が十分予想される。繰り返しになるが、今回はユニットとしてリユースしているので、この仕組みは、リチウム系に代わっても不変である。

以上

平成28年度低炭素型3R技術・システム実証事業

HVユニットをリユーズした小型風力発電システムを構築する仕組み作り

報告書

平成29年3月1日

発行： 環境省

委託先： 豊田通商株式会社

※無許可の転載・掲載を禁じます。