

次世代エネルギーシステムを支える蓄電技術 最新動向③

循環社会のアウトプットとしての電池と展開について

熊谷 枝折 *KUMAGAI Shiori*

一般社団法人 マグネシウム循環社会推進協議会 代表理事/東北大学産学連携先端材料研究開発センター

地球に暮らす人類が直面する最大の課題は、持続可能な方法でエネルギーを生産し、社会を維持するために消費するということである。その方法として、マグネシウムを新たなエネルギー・キャリアとして利用することを提案する。

そのためには、マグネシウムの広範な利用技術と電池への展開の筋道をつける必要がある。さらに、材料循環ができるようにするために自然エネルギーや余剰エネルギーを巧妙に使うことが必要となる。マグネシウムをはじめ、真に循環できる材料をエネルギー・キャリアとし、持続可能なエネルギー循環システムとして構築することによって、日本国内はもとより世界のどこでも公平に使うことができる技術として啓蒙活動を推進し、将来にわたって地球環境の維持保全に貢献できる。

最近、電池という言葉が頻繁に使われるようになったが、「電池とは、電気エネルギーを得るための変換装置の一つ」を意味する。広義には物理電池と化学電池に分けられ、熱エネルギー、原子力エネルギー、太陽エネルギー、化学エネルギーを電気エネルギーとしてアウトプットできるものが電池であると定義できる。

2030年頃から、リチウム電池に代わり金属空気電池が有望とみられている。金属空気電池としてマグネシウム空気電池があり、資源の豊富さと少ないエネルギーでリサイクルが可能なおことから、エネルギー・キャリアとして、さらに環境配慮型の革新的な二次電池として、循環社会の中で最も有望な電池である。

はじめに

これまでの我々の歴史を顧みると、1760年代にイギリスの産業革命、1830年代に鉄道による輸送革命、1873年英国で電気自動車が開発、1950年代の日本4大公害病、1972年ローマクラブ「成長の限界」、1987年国連ブルントラント委員会「持続可能な開発」、2000年ミレニアム開発目標(MDGs)、2015年持続可能な前進のための2030アジェンダ(SDGs)があり、こういった国際動向を私たちの活動指針としている(図1、表1)。

エネルギーと環境の相反するテーマに関して、環境対応ができない部分を海外生産依存とするケースや「SDGs」を各企業ではイメージアップのための活動としてか捉えていないような場合も多い。

最近、私たちが最も力を入れている活動に「循環社会の構築、推進、実現」がある。そして、これからの電池は「リサイクルのできる材料の使用と実現」になる。具体的には、「一般社団法人 マグネシウム循環社会推進協議会」として約40団体の異業種、異分野のメン

バーが集まり、産学連携の活動として、切磋琢磨している*1。

協議会はマグネシウムを新たなエネルギー・キャリアとして利用することを提案しており、マグネシウムの広範な利用技術と電池への展開の筋道をつけ、真に材料循環ができるようにするため、自然エネルギーや余剰エネルギーを巧妙に使う技術を展開している(図2、3)。

図1 / 私たちの立ち位置

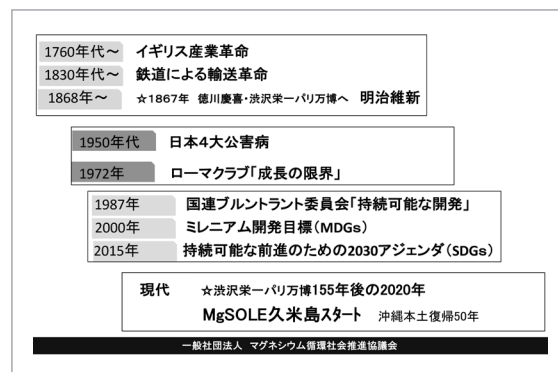


図2 / マグネシウムの循環図

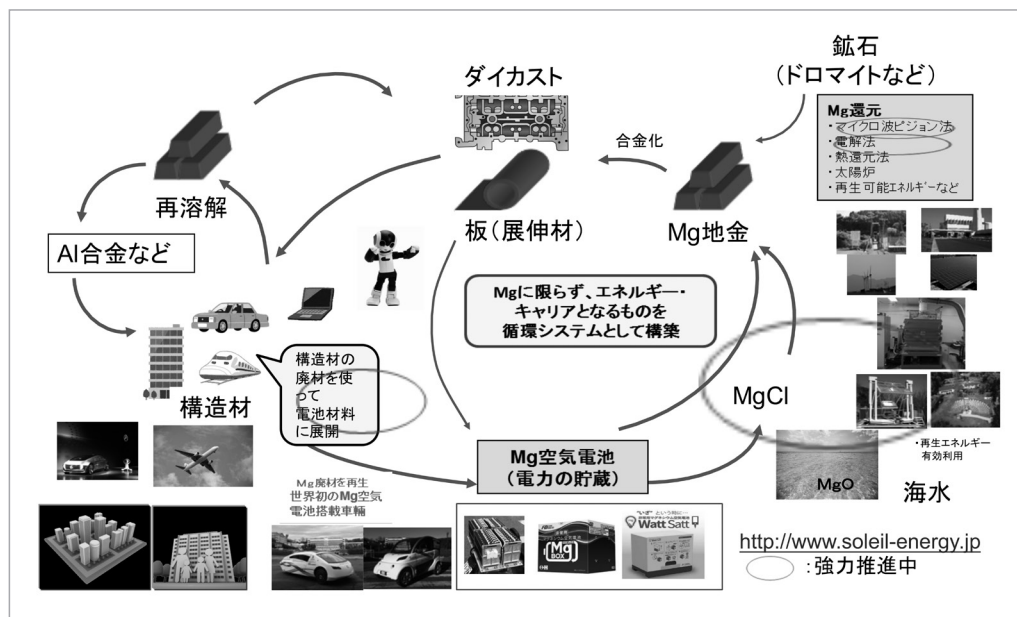


表1 / 私たちの活動の在り方

<p>■持続的発展の在り方としてのSDGs ビジネスの観点から、Society5.0(ソサエティー5.0)というコンセプトを推進するための経済界のあり方として、SDGsへの取り組みが提言されている。</p>
<p>■地方創生におけるSDGs SDGsを原動力とした地方創生、強靱かつ環境にやさしい魅力的なまちづくり。 SDGs未来都市とは、持続可能な都市・地域づくりを目指す自治体の取り組み、「経済」、「環境」、「社会」の三つの観点から持続可能性を高めてゆく。</p>
<p>■世界のトレンド、SDGsとESGs 持続可能な世界を実現する動きは、世界の投資家を中心としたビジネスの観点からも加速している。 世界の解決すべき課題を「環境」(Environment)、「社会」(Social)、「企業統治」(Governance)の三つの観点からみたものをESGといい、ESGに配慮した責任ある投資をESG投資という。 EGS投資の対象は、短期的な収益だけではなく、中長期的企業価値、つまりSDGsの達成に貢献している企業である。</p>
<p>■Society5.0とSDGs ここに、経済、ビジネスの観点から、経済発展と社会的課題の解決を両立する考え方としてSociety5.0(ソサエティー5.0)というコンセプトが提唱され、これを推進するための経済界のあり方として、SDGsへの取り組みが提言されている。</p>

図3 / マグネシウム循環社会推進協議会・開発部会としての活動



1. 蓄電池として最優等生の鉛蓄電池

電池の歴史は、今から約220年前の1800年、イタリアの物理学者アレッサンドロ・ボルタによって発明された「ボルタ電池」から始まったとされている。電圧の単位「ボルト」はボルタの名前をとったものである。

自動車というべきものが最初に誕生したのは1769年。フランスで、ニコラ=ジョセフ・キュニョーにより、蒸気で走る自動車が発明された。そして1859年、フランスのガストン・プランテが鉛蓄電池を発明した。電気自動車(EV)の歴史はガソリン車よりずっと古く、モーターは1823年に発明されており、EVは1873年の英国から始まっている。既に電気式四輪トラックが実用化されており、鉛電池を搭載し、史上初の時速100km超えを達成していた。これはまぎれもない電気自動車であり、フランスでも1899年にジャメ・コンタント号が105.9km/hを

現在、我々が使用している化石燃料は、約2億年前に宇宙からのエネルギーでつくられたものといわれているが、地産地消のエネルギーシステムを実現し、例えば2日前に海水から汲み上げられたマグネシウムのエネルギー(電池)を使って備蓄することが可能になるかもしれない。

循環社会のアウトプットとしての電池と展開について

達成していたと記録されている。

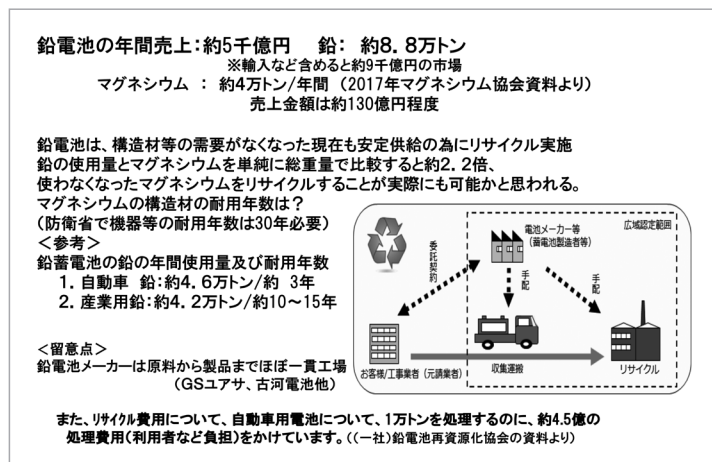
1950年になると、モータリゼーションの発展に伴い自動車用（始動用）電池が急速に伸びた。密閉形の陰極吸収式（制御弁式）小形シール鉛蓄電池が登場し、各種のポータブル機器に採用された。その後、二輪車用や据置用電池などにも拡大していった。この電池はスタンバイユース（エンジン始動用などを含む）だけでなく、サイクルユース（EV用など放電充電をくり返す仕様）としても長寿命のものが開発され、さらに2009年にはアイドリングストップ車用に鉛蓄電池が採用され、広く普及している。

これら一連の開発によって、鉛蓄電池が現在までに二次電池の大容量蓄電池の主流となっている。そしていつの時代でも、電池の開発には電気自動車のニーズ・開発と関わりがある。持続可能なエネルギー循環システムとして構築するには、リサイクルできる材料の使用と実現が必要であり、その意味で鉛電池は歴史からみても紛れもなく最優等生である。

日本国内では既に100%近くリサイクルが実現できている（図4）。最近「鉛フリー」（鉛を含有しない）という言葉が発信されているが、電池の分野では普通に自動車や非常電源に搭載されている。言い換えれば、電池として最優等生の鉛電池を搭載してガソリン車に引けを取らない効率の良い自動車が開発されれば、EVは実用化できるといえる。

一般的な概念として、ガソリンのエネルギー密度は鉛蓄電池の約500倍、現在の電気自動車に搭載しているリチウムイオン電池でも、監視装置等の重量を入れてしまうと鉛蓄電池の3倍程度である。

図4 / 鉛電池の国内市場規模とリサイクル（マグネシウムとの比較）



2. 循環社会のアウトプットとしての電池

既存電池の改良だけでなく、新しい材料や構造、蓄電池原理を使う新型電池の取り組みが進められている。注目されている量子電池や全固体シリコン二次電池等、民間の独自開発も少なくないが、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）などの国レベルの取り組みが中心となっている。大容量の全固体リチウムイオン電池、リチウム硫黄電池、リチウム空気二次電池、亜鉛空気電池二次電池、マグネシウム空気二次電池、高価イオン電池（マグネシウム金属負極電池）等がある。

リチウムイオン電池はセル当たりの起電力が高く、エネルギー密度が鉛蓄電池の5～6倍に達すると表現され、エネルギー密度サイクル特性等にも優れていることが報告されている。しかしながら、多くの電池セルを接続した大容量となる定置型蓄電システムとしての導入、実用化事例は少ない。

全固体電池については、経済産業省自動車課を中心に官民協調で、2050年に向けた基本方針と具体的アクションについて検討している。「SOLiD-EV」（NEDOの先進・革新蓄電池材料評価技術開発プロジェクト）では全固体電池が対象で、高温での放電性能（100℃ 1.500C）など、技術の概要と開発動向、開発体制とし、充放電反応中の解析技術の展開があり、次世代電池として有望である。

しかし、リサイクルや循環社会、電池は組電池であることなど、電池としての実用化に向けての対策に関わる事項については現実的なものとして報告されていないのが現状である。今後は、広義としての各電池の長所を生かし、制御技術を駆使して複数の種類の電池の組み合わせ、ハイブリッド電池システムとして構築することになる。

図5に「循環社会のアウトプットとしての電池」として今後の展開についてまとめた。自動車用搭載電池の将来見通しとしてもみていただきたい。

3. マグネシウム空気電池とは

私たちは、マグネシウム（Mg）をエネルギー・キャリアとして位置づけて循環社会を構築・実現することを継続している。マグネシウム空気電池（図6）は約40年前以上も前に海水電池として発売された時期があったが、一次電池の高容量化やリチウム電池の高性能化で陰に隠れてしまっている。東日本大震災の教訓から、持ち運びが容易なことや電解液を入れなければ長期保存がで

図5 / 循環社会のアウトプットとしての電池

**電池開発は⇒2020～2025年にかけて、
リチウムイオン電池の高性能化**(コスト、信頼性、長距離走行、..)

※携帯電話搭載電池は約10wh程度、EV搭載の為にはその約5000倍必要

リサイクル優等生の鉛電池は密閉型でメンテナンスフリー、連続した浮動充電が可能、電源として使用されて行く。
⇒2030年に向け、**新型電池開発へ** (金属空気電池など)

◎**金属空気電池**の主な負極と資源の採掘地

マグネシウム(各地・海水、鉱石)、**リチウム**(塩湖)、**アルミ**(熱帯雨林)、**亜鉛**(各地)
※リチウムの資源争奪戦が起きている。

⇒**エネルギーキャリアとして推進**:(水素、アンモニア、マグネシウム)

電池の役割は、蓄電から燃料源に
テクノロジーは、電池と制御技術に
環境対応として、リサイクルできる材料の使用と実現

図6 / マグネシウム空気電池とは(循環社会のための一次電池として)

正極に空気中の酸素、負極にマグネシウム金属を使用した(一次)電池
(電解液は一般的に食塩水)

- 全て安全な材料
- 全て資源的制約のない材料

反応式

正極 : $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
 負極 : $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$
 全反応 : $Mg + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$

今後も
● 有機溶媒、レアメタルを使わず「**素材の循環**」ができる。

ることから、携帯電話の充電用電池として実用化されている。材料にはレアメタルを使わず、電解液には有機溶媒を使用せず、紙容器を採用しており、一般ゴミとして廃棄可能な電池である。

また、構造材として使用されているマグネシウム合金の廃材を電池に使用することも実証され、まさに素材の循環、リサイクルが可能となっている。

図7、図8にマグネシウム空気電池とリチウムイオン電池、各燃料電池との比較について示す。

図7 / マグネシウム空気電池の優位性 リチウムイオン電池と金属空気電池の比較

	リチウムイオン電池	(マグネシウム空気電池には電解液重量含まず)			
	LiCoO ₂ /C	リチウム空気	アルミ空気	亜鉛空気	マグネシウム空気
重量エネルギー密度(Wh/kg)	390	3500	4302	1086	3924
電池電圧(V)	3.5	2.9	2.7	1.7	1.2
クラーク数	希金属含有(Co)	0.006	7.56(3位)	0.004	1.93(8位)
安定性	×	×	○	○	△
採掘地域	塩湖	塩湖	熱帯雨林地域 精錬に電気エネルギー多く必要	各地鉱山	各国(海水中) 精錬に電気エネルギー不必要 →余剰電力利用 熱エネルギーで精錬可能 ⇒循環システム

次世代エネルギーシステムを支える蓄電技術 最新動向③

循環社会のアウトプットとしての電池と展開について

図 8 / 各種燃料電池とマグネシウム空気電池の比較 他に AFC (アルカリ)、MFC (バイオ)

		PEFC 固体高分子形 (自動車用)	PAFC りん酸形	MCFC 溶融炭酸塩形	SOFC 固体酸化物形	MGBATT マグネシウム空気電池
電解質	電解質材料	イオン交換膜	りん酸	炭酸リチウム、炭酸ナトリウム	安定化ジルコニアなど	食塩水など
	移動イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	Na ⁺ , H ⁺ , Cl ⁻ , OH ⁻
	使用形態	膜	マトリックスに含浸	マトリックスに含浸、又はペースト	薄膜、薄板	液体(水溶液)
反応	触媒	白金系	白金系	不要	不要	不要
	燃料極	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e ⁻	Mg → Mg ²⁺ + 2e ⁻
	空気極	O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	O ₂ + CO ₃ ²⁻ → CO ₃ ²⁻	O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻	O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
運転温度(°C)		80-100	190-200	600-700	700-1,000	0-50
燃料		水素	水素	水素、一酸化炭素	水素、一酸化炭素	マグネシウム
発電効率(%)		30-40	40-45	50-65	50-70	70-80
想定発電出力		数W-数十kW	100-数百kW	250kW-数MW	数kW-数十MW	数W-数kW
想定用途		携帯端末、家庭電源、自動車	定置発電	定置発電	家庭電源、定置発電	非常用電源 家庭電源、定置発電
開発状況		家庭用は実用化、自動車用は2015年に実用化	下水処理場、病院、オフィスビルなど 常時稼働形緊急電源として多数の実績がある	日本以外での実績があり、拡大中	家庭用は実用化、大型定置用は開発中	トライク、イブリット車として実証中 非常用に展開

図 9 / 再生可能エネルギー、余剰エネルギーの利用

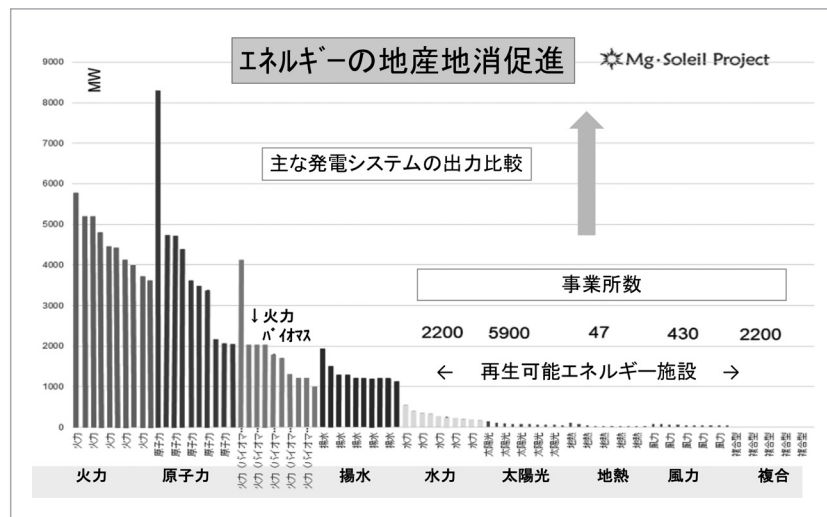


図 10 / サイエンスパーク事業とは (三好市、久米島町ほか)

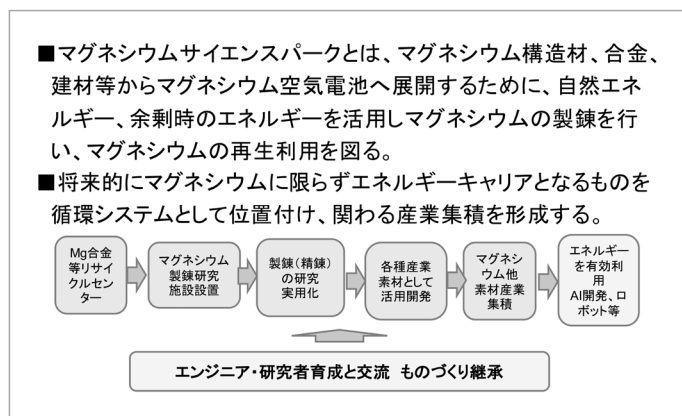
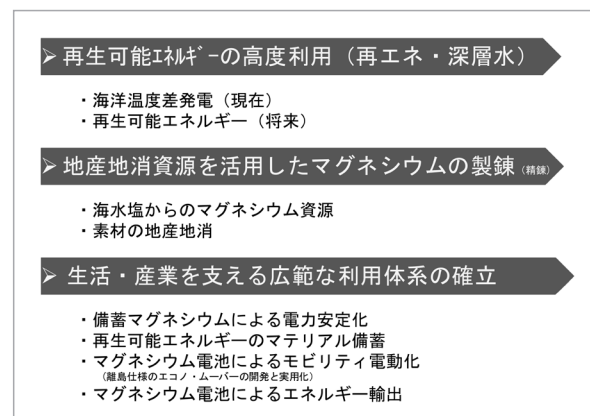


図 11 / 久米島プロジェクト



4. 地産地消のエネルギーシステムについて

21世紀に入り、再生可能エネルギー・余剰エネルギーの利用が叫ばれてきた。国内の発電量（2015年）の状況を見ると、総発電量で10億4,000万kWh、その中の水力発電を含む再生エネルギーは8,557万kWhであり、全体の約8%でしかない。

現在の国内発電量と主な発電システムの出力量比較を示す（図9）。

再生エネルギーでの発電施設は地方に多く、大きな電力消費地の送電線で送られるが、送電線建設コスト等の弊害がある。そして再生可能エネルギーの発電地（生産地）にはそれを使う産業が少なく、電力の多消費地に新幹線で移動する距離の規模で送電されている。当然「超電導による送電」はないので、遠くに行くほどロスが出てしまい、辿り着くまでの大きな熱が放出されている。エネルギーを地産地消に近づけていく活動と技術が持続性に即していることがわかる。

最も環境に優しいといわれる水力発電所の近くに電力の消費場所があったように、再生可能エネルギーの利用には地産地消の促進が必要であり、私たちの活動においても、地産地消エネルギーの上手な利用、地域の活性化、産業の創出について要望がでている（図10）。

世界的に真水をつくるのが重要になっている中で、淡水化の過程で出る苦汁（にがり）からマグネシウムをつくること、日本各地の海洋深層水事業の中で、現在取り組もうとしている久米島モデル（図11、12）は、「工業よりも農業・水産業や生活を扱う複合産業化を行っている」という独自性と、そのカスケード利用の中でマグネシウムを

つくるという図式の合理性、独自性が重要」として展開している。この部分はマグネシウムに限らず、健全なる循環社会の構築と展開に必要な事項と考えている。

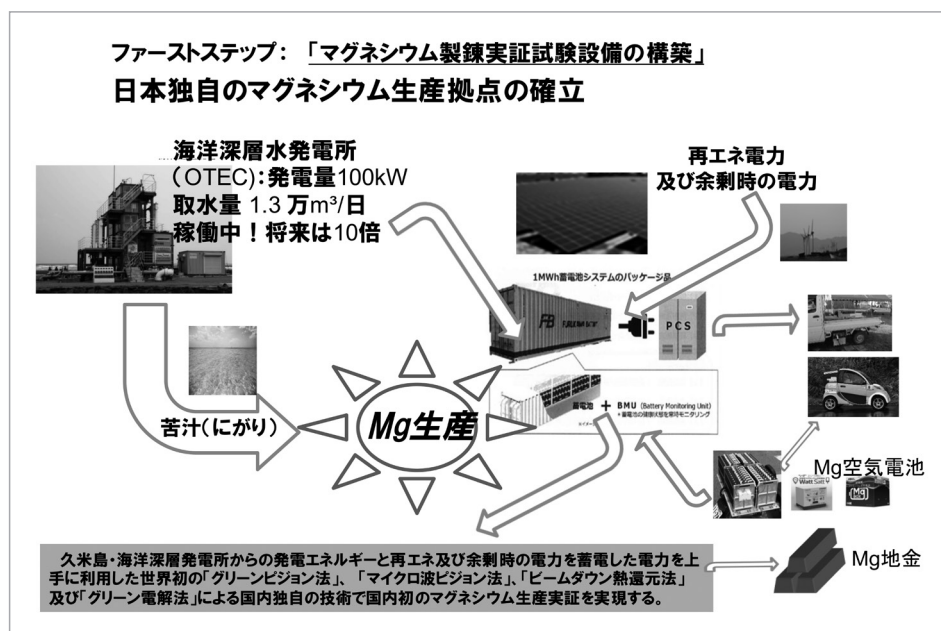
5. 地産地消の電気自動車開発が必要

現在、私たちのプロジェクトは沖縄県久米島に集中して実現しようと進めており、その成功例をもって、徳島県、宮崎県、宮城県、福島県等にも展開しようと計画している。久米島町と本島との間には電力を融通する送電線がなく、各離島はディーゼル発電で賄われており、電力会社としても経済的に厳しい状況にある。今後、電力会社と連携して再生可能エネルギーをうまく取り入れ、地産地消のエネルギーシステムを構築することが叫ばれている。沖縄県や山岳の少ない南の地方には水力発電所はつくれないが、久米島では海洋深層水プラントが既に稼働し、海水による温度差発電所がある*2。

海洋深層水にはミネラルが豊富に含まれ、それを使った産業がすでに展開されている。その副産物として残った苦汁（にがり）からマグネシウムの製錬が可能になる（図13）。その材料を使って電池にすれば、離島仕様の電気自動車にもタイムリーに充電できる。温度差発電や再生可能エネルギーと余剰時の電力を蓄電し、計画的に利用すれば、サトウキビを運ぶ電気自動車の軽トラックの燃料代（電気代）が無償になる可能性も出てくる（図14）。

電気自動車にはその車が使われる地域に合わせた（電池搭載量や充電等の）仕様が必要となる。電池搭載容量を増やせば増やすほど、走行の終わりに近づくとただの電池運搬車になってしまう。過去にクラシックカーが

図12 / 日本独自のマグネシウム生産拠点の確立



循環社会のアウトプットとしての電池と展開について

そうであったように、パワーユニット（電池など）は、その車が使われる地域での開発、組み立て、そして生産が可能である。他の地域や離島も同様であり、そのモデルは国内どこの地域にも適応できる。「海洋深層水からの発電」を「水力発電」に、または「ゴミ焼却場所でのタービンによる発電」等に置き換えれば、再生可能エネルギーからの電力供給となる。離島や遠隔地ではガソリン代が高いので、電気自動車はその地域に貢献する（図 15、16、17）。

現在、電気自動車のエコランレースから育ったメンバーが集まって、「エネルギーの地産地消+小型EVの沖縄県・島内製造」をテーマに掲げて活動が始まろうとしている。主に離島で使われる電気自動車・エコノムバーは、農山漁村及び離島の振興、観光の振興を図る活動等に特色を生かしたものであり、地産地消の交

通システムの構築と実現に繋がる。充電スタンド（マグネシウム空気電池）からでも充電できる小型電気自動車の開発が目標である。

マグネシウムエネルギー（電池）は、地球上に住む人々が誰でもどこでも平等に使える可能性がある。電気自動車エコラン競技大会が各所で開催され、当時参加した学生たちは社会人となり、電力機器の高効率化や環境型次世代自動車開発に貢献している。このような、次世代自動車技術の担い手の発掘と育成が可能になる*3。

久米島では、そうしたものづくりにおける戦いの場を提供しようと、エコラン競技大会を計画している。久米島モデルである海洋深層水プラントを周回する一般道を使ったコースである（図 18）。各チームの競技車両を運ぶコンテナの費用が賄えれば、国内のメンバーを全員集めて開催する予定である。

いつの時代でも、電池の開発には、電気自動車のニーズと開発に関わりがある。電気自動車の普及・実用化へ向かう挑戦者たちの活躍がますます期待される。

我々、マグネシウム・ソレイユ・プロジェクト（一般社団法人 マグネシウム循環社会推進協議会）は、川上から川下（原材料から製品の開発）までを、産学連携、異業種との連携による健全なる循環社会の推進と実現に向けて活動を継続しています。

*1 <http://www.soleil-energy.jp>
 *2 http://www.town.kumejima.okinawa.jp/docs/demonstration_facility_panf/
 *3 http://www.soleil-energy.jp/outline/material/external_announcement/index.html

図 13 / 海水由来のMgO製造

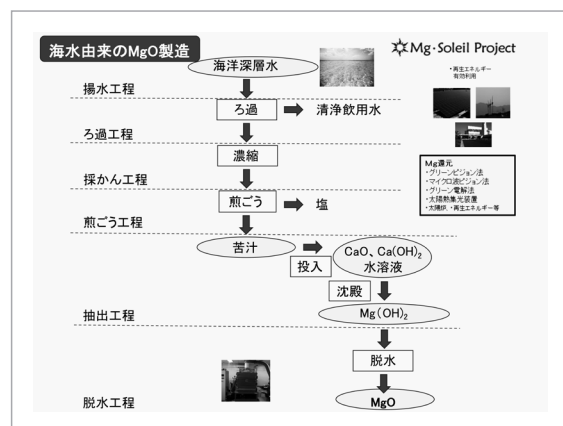


図 14 / マグネシウム空気電池搭載車両の利点

- ① 電解液（海水）を注入すると発電、走行可能となる。
- ② マグネシウムを構造材としてもアピールすることができる。
- ③ デモ走行等では、ソーラーカーと異なり、夜間は停止するにしても、走り続けられる方向が見いだせる。
- ④ 既存のEVと何が違うかをアピールすることができる。

↓

コンセプトカーとしてスタートする。

1. ミニEVにソーラーパネルを取り付けたソーラーカー
2. マグネシウム空気電池（燃料電池）とのハイブリットソーラーカー
3. 充電スタンド（マグネシウム空気電池）からでも充電できるミニEV








図 15 / 10kWhのエネルギーで走行できる距離(シミュレーション)

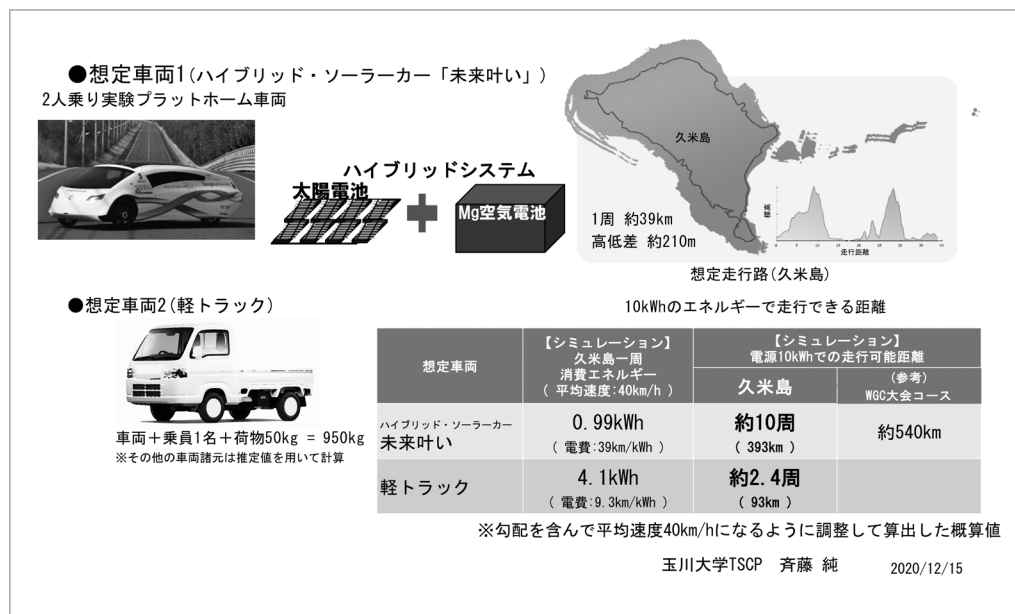


図 16 / 離島仕様のEVに求められるもの

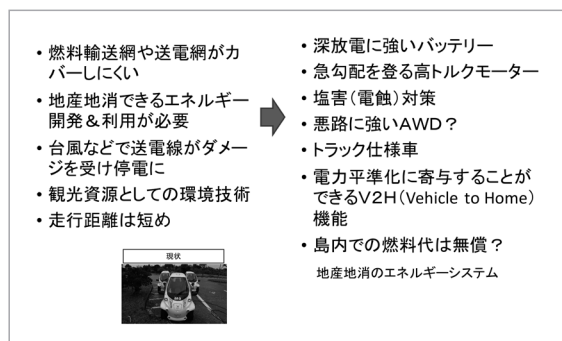
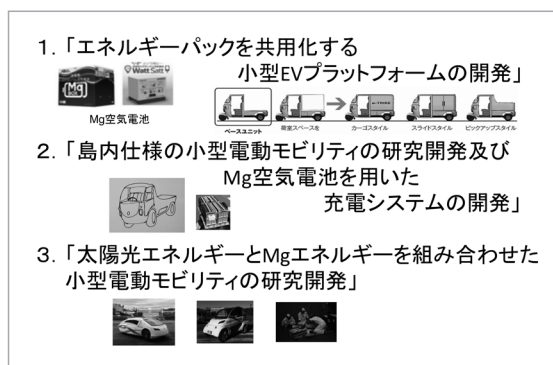


図 17 / 次世代EV開発テーマ(提案名)



※東海大、東京電機大、玉川大(提案資料別途あり)

図 18 / 2021 ワールド・エコノ・ムーブ・グランプリ最終戦予定(出場約30台)

