

モビリティ社会の持続的発展に向けた資源循環ソリューション構想

Resource Circulation System Concept for Sustainable Development of Mobility

土橋 正臣 山北 博士 関口 裕也 柳生 佑貴
 Masaomi DOBASHI Hiroshi YAMAKITA Yuya SEKIGUCHI Yuki YAGYU

奥田 英樹
 Hideki OKUDA

A circular economy is one of the latest trends in global sustainability endeavors. In the area of transitioning from a linear economy to a circular economy, Europe leads the way by publishing the revised ELV Regulation on July 13, 2023. This Directive requires the use of recycling material, especially plastics, 25wt% in 2030. According to this trend, European OEMs request component manufacturers to use recycling materials, which include not only plastics but also steels and aluminum. However, the compressing process is currently used for an ELV dismantling process, and compressed material contains several kinds of elements. One of the solutions is to use flexible robotic technology and apply this method to the dismantling process. Denso is endeavoring to create this system before its European competitors. The key is visualizing human flexibility and transferring it to a robotic program. This report will show our approach.

Key words :

Robot, Leader-follower system, Disassembling, ELV

1. まえがき

18世紀に蒸気機関の開発から始まった第1次産業革命は約100年の時を経て自動車の発明をもたらした。それから約100年、ダイムラーによる4ストロークガソリンエンジンの発明およびカール・ベンツによるガソリン車の販売は自動車の普及に大きく貢献。その後20世紀初頭のT型フォードの出現により大衆に広まった。欧米を中心に技術開発が進む中、日本では1930年代に現在のトヨタ自動車・日産自動車の前身が設立された。その後も企業努力と戦後の景気回復の後押しを受けてグローバルに爆発的に広まった。自動車の普及とともに1960年代後半にはその排気ガスが

もたらす大気汚染が深刻化。大きな社会問題として浮上すると1970年に米国でマスキー法が制定され、それ以降、自動車の発展と環境問題は切っても切れない関係となった。段階的に厳しく引き締められる燃費規制に加えて、環境負荷につながる材料の使用を禁止する法案が各国・地域で制定されていった。

グローバルな経済格差の縮小と人口爆発は自動車のみならず、あらゆる産業の爆発的な発展をもたらす製造過程および利用によって排出される二酸化炭素(以下、CO₂)は温暖化という地球規模での新たな課題を顕在化させ、廃棄物問題とならび人類に警鐘を鳴らしている。多重に積み重なる地球への負荷軽減と人類の持続的発展を見据え、国連は2015年にSDGsを採択。

17項目の国際目標を設定した。これを受けて各国は次々とカーボンニュートラル達成年をコミット。この動きが定着すると、資源枯渇への手立てとしてサーキュラーエコノミーのコンセプトが欧州から提唱された。

従来の消費を軸とする線形経済では地球資源を商品や価値に変えることで発展を続けてきたが、サーキュラーエコノミーが提唱するのは資源と経済発展のデカップリング、すなわち地球資源を消費せず人類に価値を提供できる経済のしくみを作ることである。そのため、これまでの3R (Reduce, Reuse, Recycle) に加え9R (Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacturing, Repurpose, Recycle, Recover) を基準とした新たな資源の有効活用を実践することが求められる。

標準化戦略で復権を目指す欧州は産官学の連携で世界の潮流を作り出している。この動きは自動車業界にも広がり、欧州委員会が2023年7月にELV (End of Life Vehicle) 規制案として発表したことを受けて産業におけるサーキュラーエコノミーへの取組みは一気に加速された。

2. ELV規制の概要と世界の動き

本章では、先に述べたELV改正指令の概要とそれを受けた世界の自動車産業の動きを説明する。

2.1 欧州ELV規制

2023年7月13日に欧州委員会から発表のあった改正ELV規制案では、廃車の処理に留まらずそのリソースを次世代カーへ活用することを要求している。加えて資源循環が自律的に回り続けることを見据え、バリューチェーンを通じての情報公開と必要なインセンティブ制度の構築をも含む。これらは現在、パブリックコメントを集約し最終案を取りまとめる渦中にあり、24年度には最終案が発表される見込みである。23年7月に提案された具体的な要求項目としては、従来からの要求項目である廃車から取出した部材のリサイクル率85%以上に加えて、2030年以降の新車に対して25%以上のリサイクル樹脂の利用を課す。そのうち25%はELV由来のリサイクル材の利用

を求める案である。これ以外にも「ELVから電池、インバータ、MG、エンジンなどの重量物を中心とした主要19品目の取外し義務」、今後のリサイクル社会の構築を見据えた「鉄・アルミ・レアメタル等のリサイクル材利用目標の宣言」、サーキュラーエコノミーにおいて欧州が野心的に市場拡大を目論む「リビルト・リファービッシュに関する評価」および「Circular Vehicle Passportを通じたバリューチェーン・トレサビ情報の共有」を謳いデジタル戦略と融合させ、新たな市場において欧州地域が有利な位置取りを進めることを目指している。日本の自動車業界はこのような欧州の動きを注視し、能動的なアクションが求められることになるであろう。

2.2 サーキュラーエコノミーを取巻く各地域の動き

改正ELV規制案で具体化された欧州戦略であるが、これ以前に各国は独自に動向を察知し既に様々な動きを取っている。主なものを下記したい。

2.2.1 欧州の動向

線形経済から循環経済への転換を牽引している欧州は、早くから各地で産官学がしっかりと連携し制度設計への提案、関連団体からのコンセプト提唱、コンソーシアム活動を通じた技術開発を全方位で進めている。主なものを下記する。

制度設計

欧州委員会を軸に気候変動と資源効率を組合せた行動計画を発信。2015年には循環経済パッケージ(CEパッケージ)を発表。プラスチックを中心に都市廃棄物の65%をリサイクルするなど野心的な目標を掲げ、6.5億ユーロの研究開発・イノベーションプログラム資金を提案している。その後も、CEアクションプランやGAIA-X構想、エコデザイン規則案など域内で生育した産業と規制等を組合せ野心的な目標の設定をグローバルに打ち出している。自動車業界にもこれらの動きは波及しており、2023年7月には改正ELV規制案につながる。樹脂のリサイクル材利用の義務化や廃車からバッテリー、インバータ、MG、一定の面積以上の電子基板および一定重量のプラスチック取出しの義務付

けなどは先述したとおりである。本規制は欧州地域での経済活動に適用されることになる。

欧州自動車業界を取巻く動き

従来の線形経済+3Rと循環経済の違いをバタフライダイアグラムとしてエレンマッカーサー財団が模式化、将来の成長戦略の姿としてシンボリックに提案した。このコンセプトに呼応するように欧州各地域で公的資金を投入した各種コンソーシアム活動が樹立されている。BMWが640万ユーロの公的資金を受け、ロボット技術を軸としたELVの解体と欧州で先行する分解部材の分別技術と樹脂リサイクルメカを連携先として加えたバリューチェーン構築に乗り出したことは記憶に新しい。BMWは2021年の欧州モータショーでも特殊キーを活用した易分解自動車シートやオールアルミの車両を出展。2023年の欧州モータショーではNeue Klasseと銘打ったリサイクル材を活用したコンセプト車両をリリースし欧州OEMの中でも表立った活動を野心的に展開するOEMであるといえる。また、トヨタ自動車に次ぐ世界シェアNo.2に君臨するVW（フォルクスワーゲン）も2023年の欧州モータショーで循環社会における取組を公表するなど各社で独自色を打出した。

部品メーカーにおいてはValcoがリサイクル材への切り替えの加速を宣言し、その実現に向けMagnoliaという部品回収の公的プロを起動すると発表している。欧州の自動車市場では、もはやサーキュラーエコノミーの取組み抜きでは商権の確保が難しい状況が整いつつある。

リサイクル材の活用に留まらず、2023年の欧州モータショーにおいてはe-Axle、特に主機モータの再利用に関するコンセプト出展も相次いでいる。ルノーのRe工場やBOSCH系列でリビルトを担うC-ECO社の立上げなどサーキュラーエコノミーを取巻くもう一つのリビルト・リユースの動きも今後の加速が予想され、BEV（バッテリー電気自動車）への移行に伴ったこれらの動きには注視が必要である。

2.2.2 その他各地の主な動向

欧州のサーキュラーエコノミーへの移行を敏感に

キャッチし措置を取っているのは中国である。また、自動車大国の米国は資源循環の観点というよりはむしろBEV化によって形成されるバッテリーの主権争いに名乗りを上げる動きを取っている。

中国の取組み

政府の強力な後押しのもと、世界最大のBEV市場を誇る中国は早くからサーキュラーエコノミーに取り組み、国策として資源循環の分野を欧州同等レベルで五ヵ年計画に織り込んでいる。また、世界各地の大手リサイクル業者を買収するなど今後、予想されるリサイクル材の争奪を優位に進める動きを既に取り始めている。中国国内においても、GENなど大手リサイクル材がELV処理においてOEMと連携を深めつつ事業規模を拡大するなど、国内外に資源バリューチェーン構築の取組みを強化している。

米国の取組み

抹消登録制度など廃車に対する法規制が存在しない米国では、ELVからの資源回収に難しさが資源循環に対しては企業の自由競争に活動を委ねている格好と見受けられる。そのため、米国OEMのGM、Fordは、BEVにおいてキーとなるバッテリーの合弁会社を設立するなど新車出荷後の回収・再利用を想定したサプライチェーン構築に活動の軸を置いていると想定される。

2.2.3 日本の自動車業界を取巻く環境と課題

2023年10月現在、弊社においては欧州OEM数社からリサイクル材の一部利用を求められておりRFQの条件に付与されることが顕在化している。この動きは日本のOEMにも波及していくものと考えられ、将来目標としてリサイクル材の利用率目標を社外発信しているOEMも出始めている。

日本は資源輸入国であり世界で有数の自動車輸出国でもある。これまでの線形経済では日本で製造された車両がユーザーの手に渡った後のトレーサビリティはその大部分が分断される。加えて、日本で廃車登録された車両は中古車として海外に輸出されたり、国内で解体された車両から部品レベルで輸出されたりもする。部品レベルおよび材料レベルで海外へ流出している数

量は、もはや把握することができず、国内に残存する廃車資源およびそこから製造が見込めるリサイクル材の量の推定は非常に困難であり、一説には新車生産に使用した資源量の10%程度であるとも言われる。Fig.1に日本で生産された新車の量的な推移を2020年の例で示す。

日本国内で処理されるELVは自動車リサイクル法によって適正に処理され、環境に負荷を与えることなく処理されている。日本の解体業者に引き取られたELVは、廃油の抜き取り、エアバッグの解放およびフロンの適正処理を経た後に手作業で希少資源（触媒のPtなど）および中古ニーズがある部品を取り除き、その後、ニブラ等を使って車両ボデーを破壊しながら車両の奥に配置されたワイヤハーネスが回収される。鉄・アルミ・小物部品の残骸・樹脂・ガラス・ゴムなど安価な資源が残されたELVはプレスされ運搬効率の高い形状で破砕業者に引き渡される。この状態をAプレ

スと呼び、重量に従った価格で取引される。引取られたAプレスは資源が混在した状態で大型のシュレツダに入れられ5mm～数cm程度の不均一かつ異種混在の粒状に碎かれる。多種材混在の粒は磁力や比重によって選別されるが、粒内の異材の分離は出来ないまま後工程に引き渡される。

これらのことから、日本の自動車業界が抱える課題は下記の2点に集約されると言える。

課題1：日本国外へ流出した廃車資源をも含めた資源量の確保

課題2：回収されたELV処理を高純度化できる技術開発によりリサイクル材の品質を高めること

日本の自動車業界およびデンソーはCASE社会および循環社会へ適合しつつ国際競争力を維持していくことを迫られる。

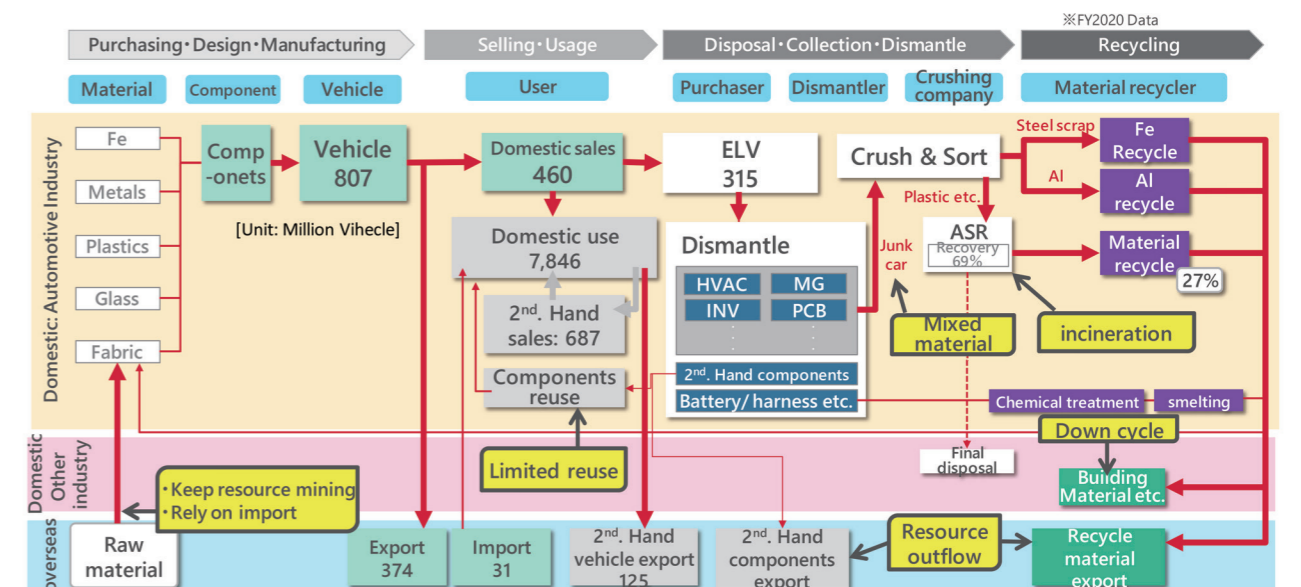


Fig.1 Vehicle Amount which is remain in Japan

3. デンソーにおけるサーキュラーエコノミーの取り組みの全体像

先に述べた欧州 ELV 規制が産業界への循環社会への変革を牽引しており、デンソーにおいてもこれを意識し5つの部会を立上げ、活動を行っている (Fig. 2)。大別すると、循環経済が自立的かつ永続的に回り続けるための社会のしくみを考えていく「部会①：政策・ルール形成部会」、従来のモノづくりプロセスを循環社会型に適合させていく「部会②：循環材生産調達部会」および「部会③：循環配慮開発企画部会」そして、

ELV の解体・再資源化に革新技術を投入し品質と生産性を革新していく「部会④：静脈プロセス再構築部会」および「部会⑤：材料アップサイクル部会」である。5つの部会は互いに連携しあい、サーキュラーエコノミー時代においてもこれまでのモノづくり領域の競争力維持と、資源循環領域の市場拡大を実現していくことの両面に取り組んでいる。そして、23年7月に発布された欧州の改正 ELV 規制案に対し、各部会でテーマを導出し全方位で取り組んでいる (Table 1)。

本テクニカルレビューでは特に部会④の取り組みについて詳述することとする。

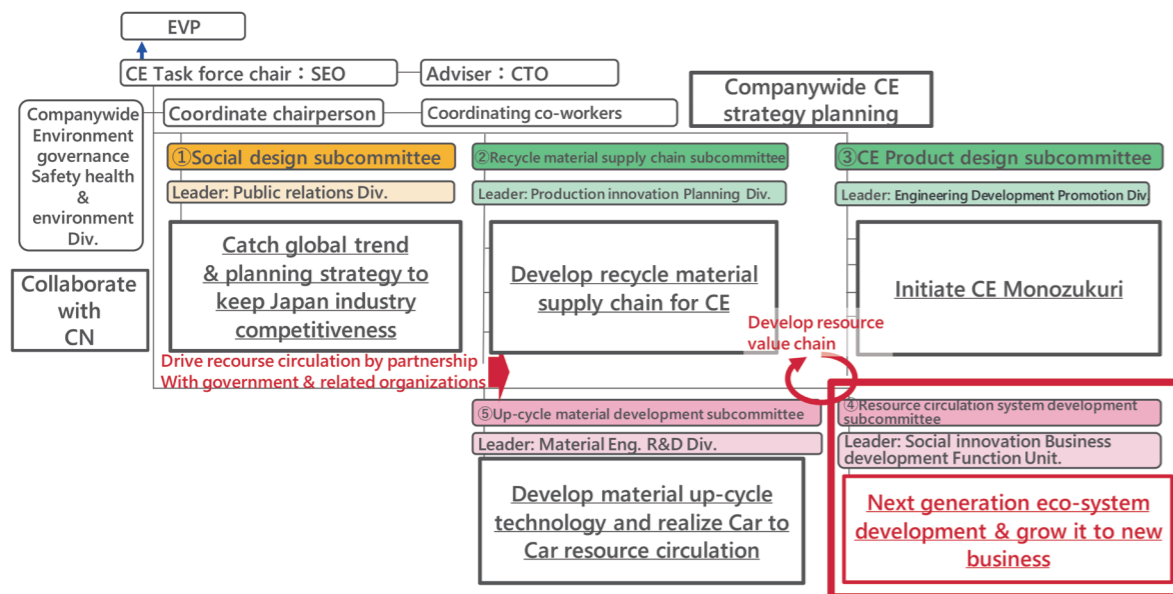


Fig. 2 5 Committee toward circular economy in Denso

Table 1 Main theme for resource circulation toward ELV Directive

1. Recycling material usage & supply chain strength	① Recycling material supply chain strength
	② Establish consortium for resource circulation market expansion
	③ Product design renovation for general material or mono-material
2. Easy discompose product development	④ Innovative disassembling technology development
	⑤ ELV Disassembling system & machine development
	⑥ Easy discompose structure reflection to next Gen. product
3. Manufacturing & drive data traceability	⑦ Expansion of Traceability PF
	⑧ Data utilization service business development
4. CE Social design	⑨ Proposal to regulation for autonomous resource circulation
	⑩ Collaboration with OEM

4. 静脈プロセス再構築部会の取り組み

4.1 静脈プロセス再構築部会の目指す姿

ELV 解体処理の現状について改めて述べる。市場から回収された ELV は精錬工程など既存の材料抽出や再生工程でも経済合理性ある材料および中古部品として再利用ニーズが高い部品は主に手作業またはニブラを用いて分解された後、鉄、アルミおよび樹脂などの一般材の混在した残存 ELV はプレス工程、破碎工程および物理・化学的選別工程を経て運搬効率と層別工程を経た後に材料再生工程に持込まれる。現在の日本では、樹脂は自動車破碎残さ (ASR=Automobile Shredder Residue) として扱われその 62% 程度は燃焼させ熱エネルギーを抽出す、いわゆるサーマルリサイクル (サーマルリカバリとも呼ばれる) 処理される。この処理には、新車購入時にユーザが負担する自動車リサイクル券の購入費用の一部が充当される。この措置により現状は処理費用と処理工数に対する均衡が維持できている。それゆえ、日本には樹脂リサイクルのインフラ構築に拍車がかかりにくいという課題がある。また、先述のとおり従来の処理工程ではリサイクル材の純度向上は望めないという課題もある。

安価な一般材を生産性の高い方法で高純度に分離し、経済合理性のある材料再生を行うことが目指す姿である (Fig. 3 参照)。

4.2 純度と生産性を如何に両立するか、その課題は何か

ELV の解体の難しさは、車種の多さ、部品点数の多さ、長年の様々なシーンで利用されたことによる劣化度合いの個体差にある。そのため、これまでは希少資源などの有益なものは手作業による取外しが行われてきた。そして、法律が定める ELV のリサイクル率 95% (ダウンサイクルやサーマルリサイクルを含む) を満足させる手立てとして安価な部材は一括破碎という手段が取られてきた。一括破碎では主に大型のシュレッダが使用され量を集めることで経済合理性を成り立たせている。

手作業に代わる純度で売価に見合った工数で ELV から均一材料の部材を取出すことが本部会に求められる本質的な取り組みである。

デンソーでは、これまでモノづくりを通じてムダ取りと自動化によって生産性を向上させ、QR コードを発明するなど早期から情報化に取り組りリーンな生産システムを作り上げてきた歴史がある。加えて、関係会社でのロボットおよび周辺のロボティクス技術を行ってきたこと、製品競争力を高める材料開発およびそのデータを保有するという強みがある。これらを活用した新たな ELV 解体システムを提案することを目標として活動する。

このような動きはサーキュラーエコノミーの先進地域でも興っており、先述のとおり BMW が自動化に取

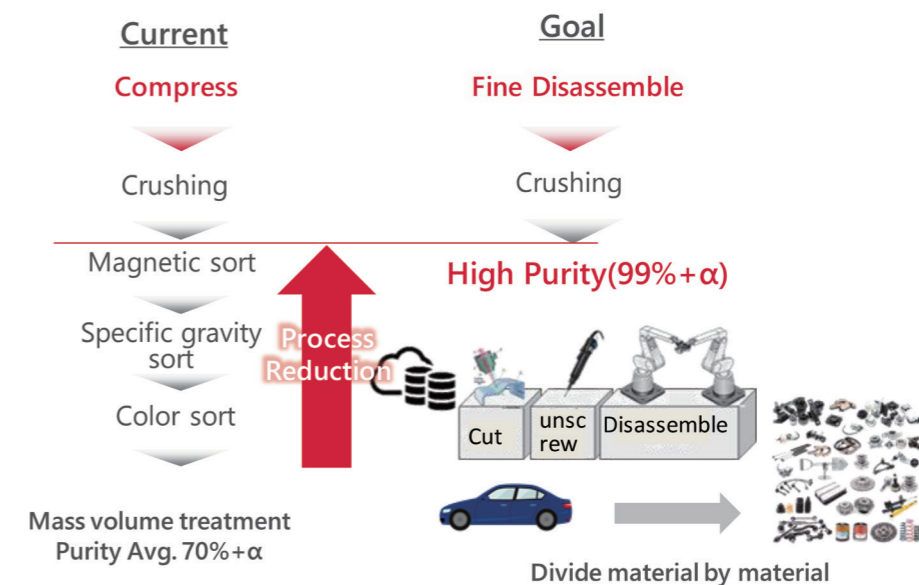


Fig. 3 Ideal Goal of high purity resource circulation

り組んでいる。彼らに先んじてロボットによる ELV の解体システムを作り上げることが最大の課題と言える。

4.3 課題解決への取組み

多種多様かつ地域と時間軸の面でランダムに発生する ELV をロボットで自動解体するには、解体手順の同定、把持計画の決定、ロボット経路の生成およびセンシングを活用した ELV 個体差の吸収が必要であると考え、これらを組み合わせたシステムを構築し一品一葉の ELV に見合ったロボットの解体工程を生成し、人手を介さず分解を終えることが理想である。昨今のデジタル技術の目覚ましい進化によりセンシングおよびデジタル空間上の誤差修正は様々な方式が開発され発展している。しかしながら、ELV を対象とした手順・把持・ロボット経路の生成においては過去に取組み事例が乏しく、これらのヒントは実際に解体を行った経験を持つ人にノウハウとして蓄積されている。これらを効率的に形式知化することが本技術のキーであると考え。

解体ノウハウを保有する人のノウハウをロボットプログラムとして形式知化するために、今回はリーダフォロワーシステムを活用することとする。リーダフォロワーシステムは、動力を持たないロボット型のコントローラを人が操作することで、ロボットを動かすことができるシステムであり、人の腕の動きをロボットに転写することが可能であるため、ロボットティーチングのスキルを保有していない人にとっても扱いやすいシステムであると考え。ELV 解体のノウハウを保有する人が腕を動かすようにロボットを操作したログを取得し、それをロボットプログラムとして再生することにより、いち早く ELV のロボット解体プログラムが生成できる。これにより、欧州勢に先がけてリーナ ELV 解体システムを実現することを目指す。

4.4 取組みの進捗

本稿執筆時点では、上記の構想を具現化すべくデンソー阿久比製作所に実際に大物部品などの分解技術開発を進めるラボを構築した段階である。今回は Fig. 4 に示すシステムを導入し、先述の構想を実行していく。

取組結果については別途、報告させていただきたい。



Fig. 4 ELV Disassembling laboratory

5. むすび

本論文では、サーキュラーエコノミーを取巻く世界の潮流を紹介するとともに、Denso が構想立案した人のスキルをいち早く形式知化するための活動コンセプトを報告した。このコンセプトを実現させ、水平サイクルの資源循環を実現すべく技術開発の推進と経済合理性の検証を行っていく。

著者



土橋 正臣
とばし まさおみ

社会イノベーション事業推進統括部
CE 推進室
ロボットを活用した解体技術開発に従事



関口 裕也
せきぐち ゆうや

社会イノベーション事業推進統括部
CE 推進室
ロボットを活用した解体技術開発に従事



奥田 英樹
おくだ ひでき

社会イノベーション事業推進統括部
CE 推進室 博士(医学)(東京女子大学)
ロボットを活用した解体技術を用いた事業開発に従事



山北 博士
やまきた ひろし

社会イノベーション事業推進統括部
CE 推進室
ロボットを活用した解体技術開発に従事



柳生 佑貴
やぎゅう ゆうき

社会イノベーション事業推進統括部
CE 推進室
ロボットを活用した解体技術開発に従事