

特集記事・3

希少金属資源と省合金型鉄鋼材料開発の今

資源効率から見た金属リサイクルのあり方

Trends of Metal Recycling from a Point of Resource Efficiency

中村 崇

Takashi Nakamura

東北大学 多元物質科学研究所
教授1 はじめに
—資源効率(Resource Efficiency) から
循環経済(Circulatory Economy) へ—

地球環境の保全が、持続可能な発展に必要であることは概念的にすぐに理解できる。しかしこれを具体的対応に落とし込むにはなかなか難しく、多くのところで価値の二律相反(トレードオフ)が生じる。まずもって地球環境の意味の定義でさえ不明確である。温暖化から来る気候変動なのか、生物多様性かもしくは古くからある環境汚染物質の拡散防止なのか、さらにはそれに加えて現代を不安定化させている経済格差・宗教感の違いから来る価値観の相違の問題など、到底一つの評価軸で表せるものではない。しかしながら漠然と地球環境のためという意識は持ちやすい。その中で資源効率や循環経済の概念が生まれてきたと言える。

資源効率がUnited Nations Environment Program (UNEP)の資源パネルで議論されて久しい¹⁾。昨年からEUでは資源効率の言葉から循環経済という言葉の使用に変わりつつある。その傾向は散見できたが、それが明確になったのは、欧州委員会 2014年7月に発表された“Towards a circulatory economy: A zero waste programme for Europe”等の文書²⁾と今年Ellen MacArthur 財団でまとめられた報告、GROWTH WITHIN: A CIRCULATORY ECONOMY VISION For A COMPETITIVE EUROPE の出版である³⁾。この報告は、Ellen MacArthur 財団のEllen MacArthur氏中心にドイツ郵便財団(Douche Post Foundation)のDr.Klaus Zumwinkl氏、McKinsey 環境ビジネスセンター(The McKinsey Center for Business and Environment)のDr.Martin R. Stuchtey氏によってまとめられた。興味ある方はぜひお読みいただきたい。私にはなぜこのような言葉の変遷があったかは不明であるが、思いつく事実として、2014年秋にブリュッセルEUの環境局にWEEEやREの担当者と話をした際、RE担当者が

REの指標の難しさを話していたことがあった。REを突き詰めて評価しようとする時に用いる指標の難しさがあるのではないかと感じた。その点CEの方が次の行動に結び付きやすい。ともかく資源効率の概念よりも積極的にヨーロッパ内の雇用創出に重心を移した環境政策を纏った産業政策であると思われる。この展望はこのあたりの状況に対して我が国としてどのような対応が適切かを述べ、それに関連する金属素材、一部プラスチック素材のあり方ならびに循環経済に必要な技術開発の方向性を示すものである。

2 環境政策の変遷

製造業のあり方が環境問題で大きく変化することは、これまで多くみられる。図1に世界的な環境問題を解決ために施行された内容とそれによる産業的インパクトをまとめたものを示す。古くは、米国のマスキー法の成立⁴⁾、比較的新しいところではEUのRoHS指令⁵⁾、ELV指令⁶⁾、WEEE指令⁷⁾などがある。マスキー法などは米国における当時の日本車の輸入を抑えるためにできたともいわれるが、その規制をいち早く達成した日本の自動車産業は却って世界市場での優位性を確立することになった。RoHS種のEUにおける環境を軸にした非関税障壁になる可能性を指摘されていたが、結局の技術的壁は我が国の電気産業が、とりわけ材料、素材産業の協力を得てクリアーしたと言える。

ところで、国内の動きはどうであろうか。我が国の場合、環境に関しては、図2のような法体系になっており、多少海外と異なる。最も異なる点は、廃棄物の定義かも知れないが、それについての議論はここでは行わない。大きく環境規制の法律とリサイクル促進の法律からなっている。また、法律では廃棄物法では制御できなかったリサイクル対象物が個別リサイクル法として別途定められ、運用されている。それぞれ、大きな社会問題化した事項を我が国でスムーズに解決する方

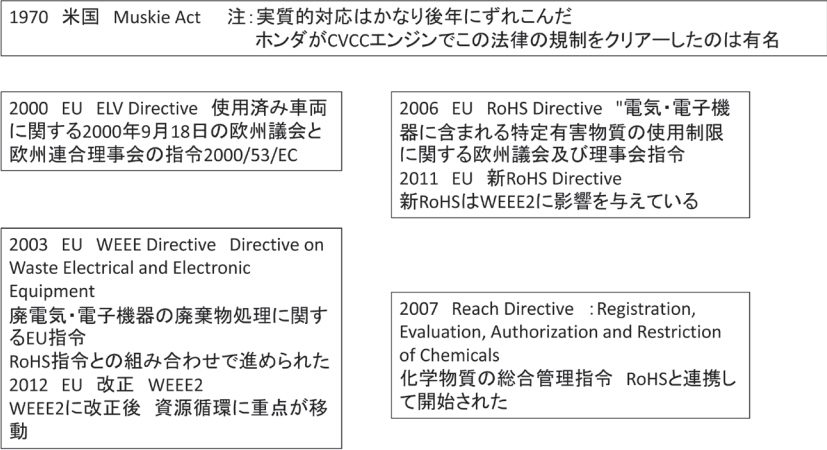


図1 産業に大きな影響を及ぼした米国、EUにける環境・リサイクル関係の指令等の開始年

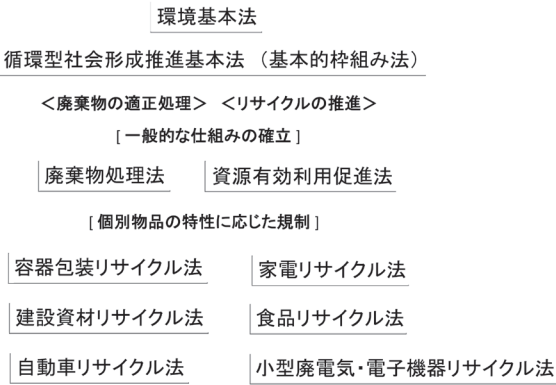


図2 我が国の循環型社会の形成の推進のための法体系

法として導入された。容器包装リサイクル法や家電リサイクル法などは世界に先駆けた法律であり、我が国が誇るべきリサイクル法であるが、資源の世界的な流れの中で動きが十分でなくなる問題点が出てきている。最近2013年に成立した使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律については自治体主導での廃小型電子機器の回収であり、最近の資源価格の下落により、回収が苦戦していると言われている。個別リサイクル法についてのコメントは避けるが、ともかく我が国にもEUと同じか同等以上のリサイクル法が運用されているという認識は持ってもらいたい。

そのほかにも環境規制としては、大気⁸⁾、水質⁹⁾、土壌¹⁰⁾などの環境規制法もしっかり規定されており、最近は言葉さえも聞かれなくなったダイオキシンに関する特別措置法¹¹⁾や新しいところでは水銀条約(Minamata Convention)¹²⁾なども設置されている。これらの規正法は直接的に産業技術に影響を与えることがある。約15年近く前になるがダイオキシンの特別措置法が制定された時には、産業としては鉄鋼のリサイクル、アルミニウムのリサイクルなど金属リサイクル業

に大きな影響が出た¹³⁾。また水銀の規制に関しては、名前にもなった水俣病が顕在化した初めての国であったため、工業システムからの水銀の排除は世界に先駆けて進み、苛性ソーダ電解における隔膜電解法の確立にいち早く成功、普及させた¹⁴⁾。これなどは、環境規制が産業プロセスを一変させた好例と言える。

このように環境問題は製造業のありかたに大きな影響を与えるが、今回の循環経済の概念の導入はどうであろうか。まだ、具体的には見えていないが、著者が興味を持って考えてきた可能性を以下に述べる。

まず、資源効率については、初めにこの言葉を耳にしたのは、やはりEUの環境関連の会議に参加した時で、ちょうどUNEPの資源パネルが設立した時期とほぼ同じである。このときのUNEPのHPを読んだ時の感想はなんと壮大な捉え方をするものだと感心したし、またあきれもした。エネルギー資源は気候変動パネルで扱っているの、それ以外の資源に関しては土地、水までも含めすべての資源を含んで効率を高める必要性を説いていた。一昔前のFactor4, Factor10¹⁵⁾のイメージを持ったがその枠がさらに広げられていた。その後、その活動の成果として概念の普及が行われ、とりわけまとめやすい金属資源の循環(リサイクル)については若干定量的にまた包括的に報告が出された¹⁶⁾。しかしながら、それ以降具体的な行動指針が出されたわけではない。それが2010－2012年くらいの間である。そのうちUNEPから移り、EU内で資源効率の基づく議論が進みだした。一部企業はその概念を先取したような活動をしてきている。このような意識の下、なんとなく概念がはつきりしないが、地球環境の保全、しいては持続可能な発展へと結びついているとして、多くの大企業が主に企業の社会的責任(corporate social responsibility, CSR)として対応しているのが現状である。その中で一部のEU企業は、積極的にこれをビジネスチャン

スとして考えているようにも見られる。持続可能性のために資源効率性を高める必要がある」という欧州ならではの論理であるが、具体的な内容は、水平リサイクルの推奨とそれを支えるトレーサビリティの確立である。リサイクラー等の管理体制に対する認証や規格化、最終製品における再生材使用率の推奨を核に幅広く政策をパッケージ化することがポイントとなっている。このようなパッケージ化、特に認証、標準化については残念ながら我が国はあまり得意としていない。現在、基本ISOとJISの対応が可能となっているが、本来JISが先にあり、これがISOの中心になってもいい状況であったが、逆に後追いになっているのが残念である。もちろん、最近是我国も標準化に関する考え方が変わって来ており、鉄鋼は我が国が中心になってISO化が進んでいる¹⁷⁾。一方リサイクル全般の標準化になるとやはり主体はEU、もしくは米国であり、残念ながら我が国のリサイクラーの世界的立場から主体をもって進めるレベルにはなっていない。欧州ではRE/CEは雇用政策・産業政策としても認識されているが、日本の産業界が不利にならないように、また、国際規格化などを通じてアジア市場などから閉め出されないように対応していく必要がある。特に、日本はトレーサビリティでは遅れを取っており、日本の強みとも言える家電リサイクルや自動車リサイクルも「ガラパゴス化」にならないように対応が必要である。

3 我が国の対応

それでは、我が国対応はどうであろうか。もちろん非常に大きな概念に対する具体的な行動であるから産業分野で大きく異なる。大きくは、最終製品を作り、供給している企業群か、そのまた部品を供給している企業群か、さらには素材提供の企業群かで大きく異なるし、かつ素材別でも全く異なる。さらに全体を情報でつなげようとする場合、大きな市場となるであろうと予想すれば、IT企業もまさに市場と見ることができる。特に、資源循環に関する最も根本的な問題は情報が連鎖しないことにありと考えると、この分野の発展で成果が大きく変わる。

例えば静脈のリサイクル産業においては、自分たちがどういう処理をしているのか、次の工程や前の工程に正確に伝えられるケースは少ない。また、静脈の複雑な処理工程を実現する上で、各事業者が持つ能力や得意分野が十分に可視化されていない。この結果、最適な処理にも至っておらず、経済合理性や競争が入りにくい状況ができています。また、静脈系の動きが動脈系産業にフィードバックされるシステムは、家電リサイクルのように直接リサイクル現場に動脈系企業が関与している場合を除くとあまりスムーズでない。古くか

ら、動脈におけるエコデザイン（環境設計：DfE (Design for Environment)）の推奨が行われているが、静脈における製品情報を活かして処理工程を効率的に最適化するプロセスも、いずれも進まない状況にある。

ここであまりに概括的な話をするよりも現在の鉄スクラップの現状を例に国際資源循環、リサイクルを考えることにしたい。まず第一に考えなくてはならないことは、古くは鉄鋼製品が、一部の特殊鋼、高級鋼以外は本来地域限定の製品であったということである。したがって、鉄の電炉によるリサイクルは地域産業として存在できた。これは、我が国も初め、世界共通であったし、今も多くの国がそうである。ただ、先進国と開発途上国では、普通鋼の必要性、また高級鋼の製造技術の問題があり、大きく異なりつつある。総じていえば先進国はすでに社会インフラが整っており鉄スクラップの輸出国であり、これからインフラを充実させようとしている途上国は輸入国になる傾向がある。図3に2013年の東アジアにおける鉄スクラップの動きを示す。これからわかるように米国、日本は鉄スクラップの供給国である。ただ、米国にはずいぶん前から高炉工場はなく、電炉での鉄鋼生産が主体であり、我が国でも電炉による製鉄はまだしっかりと行われていることは十分に認識しておく必要がある。

現在、韓国、台湾、中国は鉄スクラップの輸入国になっているが、最近の中国経済の減速により設備過剰になった中国鉄鋼生産の一部の鉄が経済原則を無視した形でアジアを中心に流通する状況が出てきており、スクラップ鉄の価格低下が著しい現象が起こっている。このようなことは、以前にも在ったが、そのときは中国をはじめとするBRICs諸国の経済発展が飲み込んでしまった。今回は、それらの国が新たな供給元となっているわけで、そうそう簡単に以前のように収まらない可能性もある。このような現状で、現在世界規模で多くの資源が瞬間的には供給過剰であり、価格の低下が起こっている。当然この傾向は、一時期供給が懸念されたいわゆる

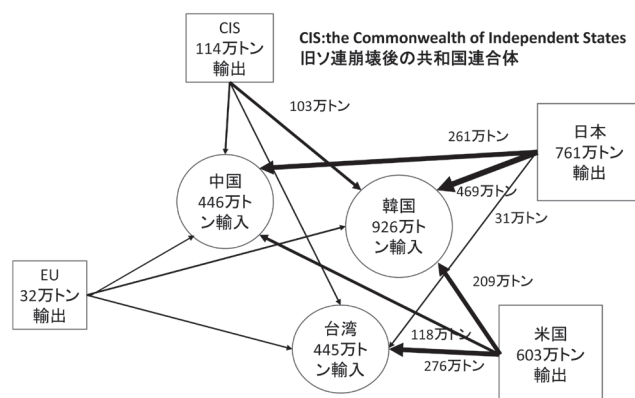


図3 東アジアにおける鉄スクラップの輸入状況 (2013年)
各国輸出入統計を元に作成

レアメタルでも同じである。

さて、鉄スクラップの世界的な流れが上手く行かない状況が生じると何が起ころうか。図4に我が国の鉄、アルミニウムスクラップの流れの概観を示す。収集・解体後は必ずしも100%ではないが、大型産業機器、車など廃製品のスタートは、シュレッダー処理される可能性が高い。国内の大型シュレッダーは主に鉄スクラップ関連業者が保有しており、そこで破碎されて鉄が取り出された後に、残り分が非鉄スクラップ問屋に回っていくという流れが多くなる。つまり、金属循環の静脈フローにおける上流に当たるのが鉄スクラップの排出である。その鉄スクラップが経済合理性をなくせば、そこから派生する非鉄系素材ならびに一部のプラスチックなどの発生も影響を与え、素材全体の循環利用に影響を与え、場合によっては我が国において、リサイクル全体が回らなくなるということが起こる可能性を秘めている。

このように循環使用が経済合理性を維持困難な時期にCEなどの政策を海外の関係で導入を迫られることは注意が必要である。そのほか金属素材競争力強化プラン¹⁸⁾にあるとおり、今後、製品ニーズの高度化・多様化を受けて、素材を複雑かつ最適に組み合わせるマルチマテリアル化や分散・非濃集化が進む。今後の動脈産業のためであるが、進むほどに、リサイクル、特に水平リサイクルが難しくなる。また、CEを考慮すると非常に高度なマルチマテリアル化が進みにくくなる可能性もある。本質的には、循環使用を考慮したマルチマテリアル化が必要であるが、それは次の課題である。ただ、準備は必要であり、総合的な概念が理解されにくい我が国の社会での啓蒙が必要である。

我が国の鉄鋼生産に関しても、世界の高級鋼の供給元としての位置づけであるが、全体として技術の飽和現象が起こっている鉄鋼材料分野で常に最新の材料技術を開発していくのは、容易ではない、鉄スクラップを利用した高級鋼の新

しい製造技術も考えるべき時期に来ている。このことをEUや米国、さらには韓国、中国、インド等の国に先んじられれば、それを基に大手ふってCEの概念を入れ、自国の素材供給を有利に進める戦略が採られることが想像できる。実施するかどうかその時の経済状況に依存するが、技術ストックの重要性は高い。

特にこのことを実現するには、スクラップ管理と管理されたスクラップを利用した技術の組み合わせで対応しなくてはならず、その情報管理のシステムと技術が必要になる。この両方ともに我が国は十分に実現可能ポテンシャルを有するので、できれば10年くらいの実現に向け、産官学の連携を進めて欲しい。

4 CEに向けた技術課題

CEを実現するための具体的な技術課題はどこにあるだろうか。廃製品を資源循環する場合、始めに行うことは、解体である。解体は同じものが連続して流れてくることはまずなく、種々の形態の廃製品が持ち込まれる。そのようなものに対して、始めは大きく素材別に解体がなされる。この部分の自動化技術が重要で、ここにはロボット技術が有効であることはすぐに理解できる。ただ残念ながらロボット研究者はこのような分野には興味を持たない。また、解体の結果として生じる2次原料の情報制御もIOT技術として大きなインパクトが予想されるが、またこれもこのような分野に正面切ってIOTを導入するということを情報処理研究者は考えない。このミスマッチを是正するような国のプロジェクトが重要である。この部分は、ある意味で静脈系の企業の大企業化に伴い、ある意味での2次資源の情報公開とつながる。したがって、既存の企業からの大きな抵抗が予想されるが、世界的規模での資源の流れ、また社会的企業価値の存在を考えれば避けて通

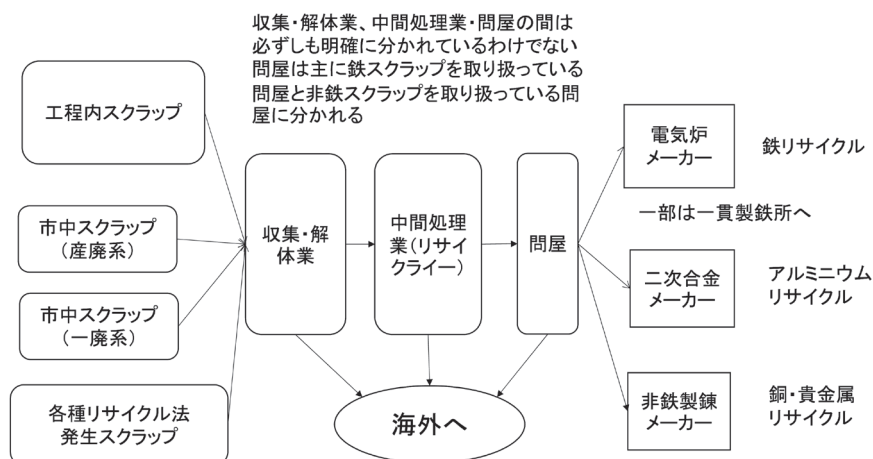


図4 産廃・各種リサイクル法をベースにした鉄・アルミ・電子スクラップリサイクルの流れ

れない部分ともいえる。この部分の推進にはある程度国の指導も重要と言える。世界規模での流れを確実に読み、上記のような開発を進めるには残念ながら一私企業では難しい。

さらにマルチマテリアル化が進めば単に解体だけでない、破壊、破碎についても重要になる。現状のプロセスでは、この部分はシュレッダーが担っているが、新たな動作原理を有する新技術の開発が望まれる。例えば、粉碎一つとっても「物質を壊す」科学のあり方は大変難しい。セラミックスや高分子、金属などの対象について粉碎の科学的な理解は及んでいない。それぞれのマクロ、ミクロ、ナノの組織ならびに化学結合そのものの破壊が加わり、現象としては粉碎という形で理解されているが、自由に粉碎を制御できる理論を我々は持ち合わせていない。経験的な手法は多く存在し、粉碎エネルギーの使用量も推定できるが、粉碎の本質的理解はできていない。固体選別では、部品同士の分離、部品の破壊、内部の素子の破壊などいろいろな状況での破壊が存在し、それを自由に制御することが技術的に重要である。くどいようであるがそのための明確な理論は存在せず、かつそのようなことを研究する人も非常に少なく、分野的にはほぼ消滅している。考えている現象があまりの複雑系であり、簡単なモデルはともかく本格的な破壊のシミュレーションなどを科学的に解明することは行われていない。

我々は、現在東北発素材技術先導プロジェクト希少元素高効率抽出技術領域¹⁹⁾で電気パルスを利用した電子スクラップの新しい破碎法を検討している。さらにその後の分離は、ソーティング技術によって行うことで研究を進めている。これらは、基本的に電子スクラップのリサイクルを目的として開発中であるが、技術の基本原理は同様にも応用が利くと思われ、特に金属素材、高分子素材、セラミックなどが高度に複合化されたマルチマテリアルに対しては、我々の技術が応用可能と思っている。図5にレーザー発光分析(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)ソーティング選別の概念図を示す。これまでセンシング技術には、カメラ(形状、色をセンシング)、赤外線、X線など種々の技術が実用化

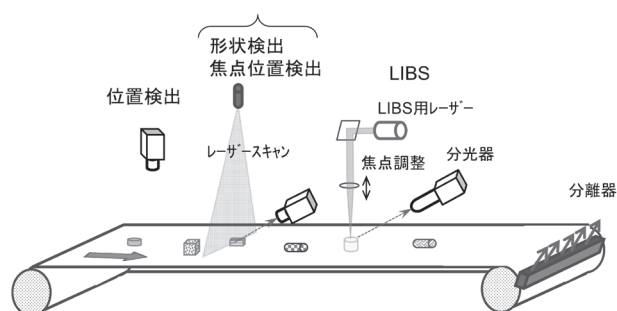


図5 LIBSソーターを基礎としたソーターの概念図

されている。我々はLIBSを利用したソーティングシステム開発を行っており、これを利用すれば鉄やアルミニウム中の軽元素も含めた合金組成別の選別が可能になる。合金別選別が可能になれば、2次合金の利用法も大きく変化することが用押され、まさにCEを実現するための大きな武器になる。そのほかこれまで鉱物資源処理技術として開発されてきた粉碎、比重選別(風力や重液選別を含む)、静電選別、磁気選別の物理選別の高度化もこれからCE政策の実現に効果的である。素材リサイクルを促進するには、技術的な観点からは破碎を含めた固体の分離が決定的な位置を占める。この分野の基礎研究が進むことをこの場を借りて強調したい。

もう一つCEに対応するために重要な課題がある。それは、素材循環がもたらす効果を科学的に明らかにすることである。単に、循環しているから地球環境にいいと言う単純な話にはならない。循環のあり方もリユースが優先されることは自明であるが、製品のリユースばかりでは、高効率の新製品の導入はできない。また、リサイクル率100%に持つていくためには、多くのエネルギーを必要とする。どこかで最適なリサイクル率が存在する。これらの評価も当然、製品、素材によって変化する。どのような評価軸を採用し、それをどのようなデータで数値化するかを考え、かつそれを世界標準にする努力が必要である。その裏付けのデータを確保するためにはできるだけ正確な廃製品からリユース・リサイクルすべての製品のサプライチェーンを通したマテリアルフローの確立が望まれる。これまで多くの研究者がマテリアルフローの研究を進め、かなりのデータのストックが存在する^{20,21)}。これは一国で成し遂げられるものではないかと思われるが、どのように主体的にかかわっていくかがアカデミアまた産業セクターにも問われる。この部分もぜひ積極的な国のかわりが望ましい。著者らは10年前に一度図6のようなイメージを基にごく一部の製品について生産に関わる資源・エネルギーなどを評価する試みを行った²²⁾が、あまりにも話を広げすぎた

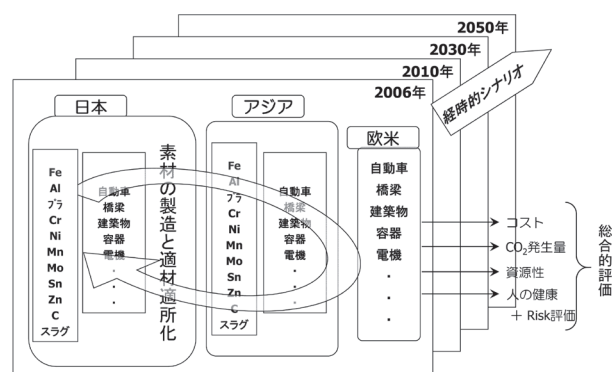


図6 エネルギーモデルとマテリアルフローモデルの融合によるトータルエネルギー最適化評価の概念図

ことまた、そのためにデータの収集が十分にできないことも手伝って残念ながら十分な成果を得ることができなかった。CEをベースにした素材のあり方を検討するためには必要な技術と考えられる。

5 まとめ

CE政策の現状を簡単に紹介し、それを基礎とした素材のあり方をまとめて見た。あくまでも定性的な分析であるが、CEに対応することの重要性を説いた。中国の設備投資の過剰による鉄構成品の過剰供給、その原因にもなっている経済の減速が起こした鉄スクラップの過剰感により、リサイクルが困難になる傾向が出てきている中で、CE政策に対応が迫られることになっている。大きな産業構造の変換点に来ていることを考え、ここで述べたプロジェクトが多くのセクターの協力を得て実現することを強く望むものである。

参考文献

- 1) UNEP : Decoupling : natural resource use and environmental impacts from economic growth, <http://www.unep.org/resourceefficiency/Publications/Publication/tabid/444/language/en-US/Default.aspx?BookID=6195>
- 2) COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Towards a circular economy : A zero waste programme for Europe /* COM/2014/0398 final */, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52014DC0398>
- 3) GROWTH WITHIN : A CIRCULATORY ECONOMY VISION For A COMPETITIVE EUROPE, <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/latest-research-reveals-more-growth-jobs-and-competitiveness-with-a-circular-economy>
- 4) Clean Air Act 1970, <https://www.ametsoc.org/sloan/cleanair/cleanairlegisl.html>
- 5) Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32002L0095>
- 6) Directive 2000/53/EC the "ELV Directive", <http://ec.europa.eu/environment/waste/elv/>
- 7) Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) - Joint declaration of the European Parliament, the Council and the Commission relating to Article 9, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0096>
- 8) 大気汚染防止法, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S43/S43HO097.html>
- 9) 水質汚濁防止法, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45HO138.html>
- 10) 土壤汚染対策法, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H14/H14HO053.html>
- 11) ダイオキシン類対策特別措置法, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H11/H11HO105.html>
- 12) 水銀条約, <http://www.mercuryconvention.org/Convention/tabid/3426/Default.aspx>
- 13) A.Buekens, L.Stieglitz, H.Huang and E.Cornelis : J.Env. Eng.Sci., 15 (1998) 29.
- 14) 相川弘明 : 国立科学博物館技術の系統化調査報告 ソーダ関連技術発展の系統化調査, 8 (2007) 3.
- 15) F.Schmidt-Bleek : Wieviel Umwelt braucht der Mensch – MIPS, das Mass fuer oekologisches Wirtschaften Birkhaeuser, (1993), English : "The Fossil Makers" in www.factor10-institute.org,
- 16) UNEP (2011) Recycling Rate of Metals, ISBN : 978-92-807-3161-3 DTI/1381/PA
- 17) 中野直和 : ISO規格 鉄鋼CO₂ 排出量・原単位算出方法, <http://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/sannkou.pdf>
- 18) 経済産業省, <http://www.meti.go.jp/press/2015/06/20150619002/20150619002.html>
- 19) 東北発素材技術先導プロジェクト (希少元素高効率抽出技術領域), <http://www.tohoku-timt.net/rare-elements/achievements.html>
- 20) S.Nakamura, Y.Kondo, S.Kagawa, K.Matsubae, K.Nakamjima and T.Nagasaka : J.Env.Sci.& Tech., 48 (2014), 7207.
- 21) T.Hirato, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : ISIJ Int., 49 (2009), 1967.
- 22) 新エネルギー・産業技術総合開発機構NEDO, 資源と環境を考慮した素材戦略モデル開発に関する調査報告書, (2007)

(2015年9月24日受付)