



アラカト

鉄鋼工学に基礎を置く環境科学の教育と研究

Environmental Education and Research Based on Iron and Steel Engineering

東北大学 大学院環境科学研究科 環境科学専攻
 長坂徹也 丸山公一 谷口尚司 我妻和明
 中村 崇 平沢政広 一田守政 藤崎敬介

1 はじめに

我が国における鉄鋼製造プロセス技術は、2度に亘るオイルショック等を経て、現状では極限とも言えるほどのプロセスの高効率化が達成されてきた。しかしながら、労務費が安いアジア諸国等の台頭が顕著であり、更なるコスト削減、高効率化、高品質化を図らなければ、我が国の鉄鋼業の未来は決して明るくない。つい最近では米国Bethlehem Steelの経営破綻が報じられたが、我が国の鉄鋼業においても、これらのことが達成できなければ同じ轍を踏む可能性すら懸念される。

一方、近年地球規模で急速に高まっている環境保全に対する危機感を考えると、環境調和型の技術開発は避けて通ることはできない。理想的環境調和プロセスとは、最少の資源とエネルギー使用、ゼロエミッション、環境負荷ミニマムで目的とする製品を得ることであろうが、現状では、さらに資源やエネルギーの投入量を最少にすること、排出物をゼロにすることは容易ではない。究極的にはこれらの達成を目指して努力すべきことは言うまでもないが、鉄鋼業の当面の目標としては、レスリソース、レスエミッション、廃棄物回生化などを挙げるのが現実的であろう。一方、鉄鋼業が有する独特の諸技術を駆使して廃棄物回生化が図れれば、新たなエコビジネスが成立する可能性もあり、環境分野は鉄鋼業がむしろ積極的にコミットしていくべき分野であるとも考えられる。従って、従来のような鉄鋼工学等の基礎の上に、環境科学の知識・手法をも習得した若い優秀な人材を確保していくことが、鉄鋼業の将来に対する重要戦略のひとつであると言える。このことから、人材育成機関としての大学・大学院も、来るべき独立法人化を視野に入れ、このような社会のニーズに的確に応える新たな組織形成が必要であろう。

2 環境科学研究科の発足

このような中、東北大学では平成15年4月より新しい大学院研究科として環境科学研究科が発足した。環境問題は単独の分野だけで対応できるものではなく、広範な学問分野から英知を結集して対策にあたるべきものであることは論をまたない。このことから、本研究科は、いわゆる理系研究科(工学、理学、農学)のみならず、国際文化、経済学等の文系研究科、さらに多元物質科学、金属材料、流体科学、東北アジアなどの付置研究所・センター、さらに連携講座として民間企業と独立行政法人からも教官を集めた文理融合型研究・教育機関として組織されており、軸足となるひとつの学問分野を身につけつつ、多様な視点で環境問題に対応できる人材の育成を目標としている。

表1は、環境科学研究科に配置換えとなった講座・部門の旧所属先の一覧表である。工学研究科材料・物性系からは、5分野が環境科学研究科に配置換えとなったが、ほとんどの分野担当教官は、いずれも日本鉄鋼協会を主な活動アカデミアとしてきた研究者である。また、本研究科に設けられている連携講座には、鉄鋼メーカーから製錬、計測制御、分析の専門家が参画している。さらに工学研究科の材料系以外の系から本研究科に配置換えになった講座の中にも、鉄鋼協会で活発に研究活動を行っている研究者が多数在籍している。すなわち、環境科学研究科の工学系のグループでは、材料工学、特に鉄鋼分野の研究者が多数を占めており、必然的に従来の鉄鋼プロセス工学、鉄鋼材料学、鉄鋼分析科学を最大限活用した環境教育・研究が進められることになる。

3 環境科学研究科の組織

本研究科は環境科学専攻の1専攻であり、6つの基幹講座、5つの学内他部局協力講座、および学外機関が担当する2つの連携講座から構成されている。各講座には2から6の分野(研究室)が属しており、基本的に大講座制となっている。組織の詳細を表2に示す。表中の網掛け分野は筆者らが担当している研究室を意味している。講座名、分野名を見て頂くと、文理融合型を標榜している通り、民族、思想、文化から、材料、バイオ、地殻、エネルギー、計測、分析など、非常に広い範囲をフォローしていることがお判り頂けるであろう。全国の主要大学でも、「環境」と名のつく学科は最近とくに目立つようになってきたが、ある特定の学問領域に大きな比重をかけた組織が大部分であり、土木、衛生工学、生物を中心とした学科が多い。これに対して本研究科は、表2よりわかるように、文理融合型で広い範囲の学問領域を包含しつつも、特に材料工学、地球(資源)工学、化学・バイオ工学から多くの人材を集めている点が特徴である。

表1 環境科学研究科参画分野

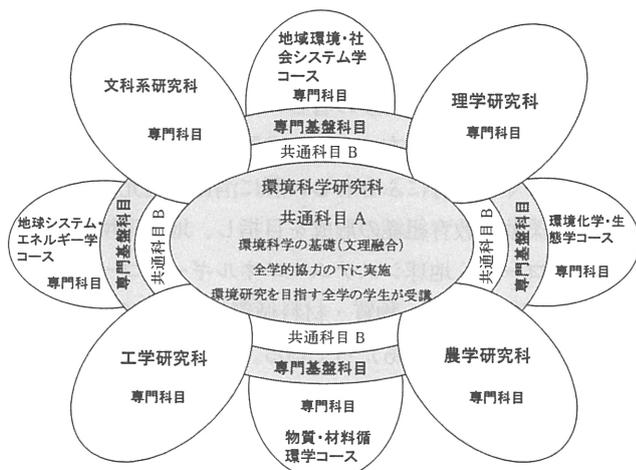
研究科・部局名	部門等名	
	専攻名	講座名
工学	航空工学	推進工学
		地球計測工学
	地球工学	地殻工学
		資源素材工学
		環境地球工学
	応用化学	分子システム化学
	化学工学	環境資源化学
	材料化学	有機材料合成化学
		量子無機材料化学
	金属工学	金属プロセス工学
材料物性学	高機能材料学	
土木工学	水環境学	
経済学	経済学	経済統計学
理学	地球物理学	環境地球物理学
	地球物理学	太陽惑星空間物理学
農学	環境修復生物工学	環境生物工学 環境生物機能学
国際文化	国際地域文化論	イスラム圏研究 アジア文化論
東北アジア研究センター	地域形成研究部門	
	地域環境研究部門	
	地域交流研究部門	
多元物質科学研究所	多元設計研究部門	
	多元制御研究部門	
	融合システム研究部門	
金属材料研究所	資源変換・再生研究センター	
	特殊耐熱材料学研究部門	
流体科学研究所	分析科学研究部門	
破壊制御システム研究施設	極限高圧流動研究分野	
連携講座(新規)	信頼性設計学研究部門	
	国立環境研究所 新日本製鐵株式会社 技術開発本部	

4 環境科学研究科の教育戦略

本研究科では、日進月歩の著しい環境科学の最先端の研究水準を常に確保する一方で、その成果や手法を、初学者にもわかりやすく、教育にふさわしい形に消化・還元することを目指した柔軟な教育組織の形成を目指し、地域環境・社会システム学コース、地球システム・エネルギー学コース、環境化学・生態学コース、物質・材料循環学コースの1専攻4コースを設定して教育にあたっている。各コースの詳細については、本研究科のホームページ¹⁾を参照して頂きたいが、ここでは図1に授業の構成を概略的に示す。人間環境等に関するコース、大きな時空間スケールで地球環境に関するコース、化学プロセスの効率化に関するコース、そして物質文明の変容による物質・材料の資源循環に関するコースとに分別し、授業科目を体系化した。共通科目A、Bおよび専門基盤科目は、4つのコースを跨いで自在に履修選択可能になっており、その上で各コースの専門科目を履修するカリキュラム構成になっているのが特徴である。すなわち、21世紀に必要な総合的な環境科学と社会学のトレーニング、および技術革新に必要な高度の専門教育を受け、かつ「環境」を対象とする科学の

表2 環境科学研究科組織表

基幹講座	専攻	講座	
		太陽地球システム・エネルギー学	太陽地球計測学 地殻システム情報学 地球開発環境学
自然共生システム学	自然共生システム学	環境修復生態学 環境分析化学 環境生命機能学 環境共生機能学	
		資源循環プロセス学	リサイクル化学 循環社会開発学 環境グリーンプロセス学 循環材料プロセス学 循環生態系計画学
		環境創成計画学	環境分子化学 ライフサイクル評価学 環境水熱プロセス学 環境調和材料強度学
協力講座	地殻環境システム創成学	環境情報学 地殻複雑系設計学 地殻エネルギー抽出学	
		東北アジア地域社会論	環境社会人類学 東アジア歴史論 環境科学・政策論
		東北アジア地域文化論	内陸アジア地域論 民族文化環境研究
	環境材料物理化学	環境材料物理化学	環境無機材料化学研究 環境有機資源科学 再生物理プロセス学
			環境システム材料学
	連講講座	環境適合材料創製学	環境適合材料創製学(新日鐵) 地球環境変動学(国立環境研)

図1 環境科学研究科のカリキュラム構成⁴⁾

倫理観、文明・文化観、社会的責任についても十分な教育を受け、環境関連の複数の分野に亘って深い知識と素養をもつ人材を社会に送り出そうというものである。

5 環境科学研究科の研究戦略

前述のように、環境問題に取り組む組織として、文理融合型はひとつの理想的姿であると思われるが、研究科全体として、研究ベクトルをいかにして揃えていくかは今後の大きな課題のひとつである。既に研究科内では、定期的に研究企画委員会を開催し、講座・分野を超えてお互いの研究内容に対して活発な意見交換を行っている。ここでは、著者らの所属している各分野の研究戦略について概略を紹介する。

5.1 循環材料プロセス学分野(谷口担当)

本分野は、金属工学専攻に所属していた当時には、鉄鋼を主とした材料製造プロセスの化学工学的研究を行っていた。環境科学専攻に移籍後は、金属材料を中心とした環境調和型材料プロセスの研究を展開していく。当面はこれまでの研究成果を土台として、(1)電磁力を高度利用した環境調和材料プロセスの研究、(2)気相および液相中浮遊粒子の凝集・分離に関する研究、(3)マイクロ波を利用した環境・材料プロセスの研究を推進していきたい。(1)の研究では、廃棄物からの非鉄金属片のうず電流分離、金属スクラップの迅速誘導溶解・攪拌、熔融スクラップからの微細介在物の電磁分離、などの研究を行う。特に介在物の電磁分離の研究では、現在カスケードリサイクルされているアルミニウムの展伸材スクラップからの微細介在物除去を目指す。また本法を応用して、セラミックス粒子を局部的に電磁集積した新しい粒子分散複合材料の開発も手がける。(2)の研究では、本分野でこれま

で金属中介在物除去特性を対象として蓄積してきた水モデル実験の成果を、高効率の廃液浄化プロセスの開発につなげる。具体的には凝集速度を支配する要因(乱流、界面物性、電場、磁場など)の影響を明確にし、凝集体の浮上・沈降特性や、気泡による捕捉特性についても解明する。また、製鋼ダストの気相凝集制御に関する研究も遂行する。(3)の研究では、クリーンな加熱法として注目されているマイクロ波を利用した新規プロセスの開発を目指す。具体的には高炉スラグのマイクロ波照射による特定結晶相の肥大化とクラックの導入による高効率な粉砕・分離法の開発、マイクロ波磁場の利用による導電性粒子や細線のマイクロ電磁プロセッシングの研究などを行う。

5.2 ライフサイクル評価学分野(長坂担当)

本分野は、旧金属工学専攻環境調和プロセス工学分野で、元来非鉄製錬学の研究室である。環境科学研究科では、ライフサイクルアセスメント(LCA)やマテリアルフロー勘定(MFA)に基づいた環境負荷評価と環境調和型新プロセスの開発を研究の柱としていく計画である。現在の研究テーマは、都市ごみガス化溶解プロセスにおける重金属類とダイオキシン類の挙動解析、鉄合金浴による石油コークスのガス化とライフサイクルインベントリー解析、NO_x等環境負荷物質の生成機構解明と分解触媒の開発、化学吸収による燃焼排ガスからの炭酸ガス除去・固定化法の開発、製鋼スラグ・ダストの高度リサイクル法の開発、電池材料のリサイクル法、などについて基礎的に研究している。中でも、製鋼スラグ中のりんの分離・回収法については、今後重点的に検討したいと考えている。りん資源の経済的確保はかなり切実な問題であるが、鉄鋼製造プロセスでは、鉄鉱石中の微量のりんをほぼ全量製鋼スラグに分離・除去しており、製鋼はりんの濃縮工程と捉えることもできる。スラグ中におけるりんは、大部分がりん酸カルシウムとして存在しており、冷却条件を制御することによって、数百ミクロンの粒子に成長させることができる²⁾。このりんの50%程度を分離できれば、得られたりん濃縮物は高品位のりん資源として利用でき、残分は製鋼スラグとして再利用できる。このような製鋼スラグからのりんの分離について、我が国におけるりんのMFAを踏まえて、具体的な方法論について検討していきたい。

5.3 環境調和材料強度学分野(丸山担当)

CO₂排出に起因する地球温暖化は、最も重要な環境問題である。CO₂の30%は発電業から、20%は自家用車を含む輸送部門から排出され、これらが最も悪物とされている。環境調和材料強度学分野は、これら2つの地球環境問題の解決に貢献することを目指している。発電業では、電力の

50%強を化石燃料の燃焼で生産(火力発電)しており、これが、主CO₂排出源である。火力発電は熱機関であり、運転温度を上げれば、その効率が向上し、燃料の節約とCO₂排出抑制を達成できる。しかしLNG複合火力や超々臨界圧石炭火力発電の効率向上には、高温に耐える材料の開発が不可欠となる。当分野では、ガスタービン発電機の耐用温度を支配する熱遮蔽被膜の劣化、石炭火力用耐熱鋼の強化などに関する研究を通して、火力プラントの運転温度向上に貢献したいと考えている。

自動車においても、CO₂排出抑制は最重要課題である。燃料電池車、ハイブリット車など、新しい動きもあるが、車輛の軽量化はCO₂排出削減に大きく貢献する。自動車は、鉄部品からアルミニウム部品への転換で軽量化してきた。比重がアルミニウムの2/3であるマグネシウムを使えば、更なる軽量化が可能である。ただし、アルミニウムと同等の加工性、室温強度と高温強度を有するマグネシウムの開発が必要である。本分野では、マグネシウムの加工性および高温強度に関する研究で、この課題解決に貢献する。また、TiAl合金は、軽量で、高い高温比強度を持つ金属間化合物である。この材料は自動車のターボチャージャーロータとして実用されており、自動車エンジンバルブ、航空機タービンブレードなどの高温材料としても注目されている。本分野では、この材料の組織設計に関しても、世界をリードする研究を行っている。

5.4 再生物理プロセス学分野(中村担当)

本研究分野(多元物質科学研究所、資源変換・再生研究センター)では、環境負荷の少ない高品質素材再生プロセス原理の探索と検証、素材およびエネルギー資源の有効利用と地球環境保全を両立するための技術情報の解析とデータベース化、素材の製錬・精製プロセスの飛躍的な高効率化を生む新しい基盤技術の確立、プロセスの複合化や簡略化による廃棄物や廃熱を出さない素材システムの提案と構築等素材再生に関する多様な研究を進めている。基本概念として素材廃棄物を単に無害化あるいは減容化するのではなく、対象となる素材を構成している元素の自然循環と人工循環のバランスを考え、できるだけ従来の素材プロセスの設備と技術を生かした素材再生プロセス工学を積極的に展開している。現在行っている基礎研究の具体例を挙げると、ダイオキシン類の物理化学性質のデータベース作成とde novo合成反応速度に関する研究、炭材混合充填層燃焼プロセスによる有機塩素化合物汚染物質の浄化、基幹金属素材製造プロセスを利用する廃棄物の資源化および減容化、廃棄物溶融炉における重金属の分離回収に関する基礎的研究、鉄鋼原料予備処理プロセスの高効率化と環境問題、金属素材の循環システムの最適化の基礎研究、等である。詳しくは本研究分野のホームページ³⁾を参照

されたい。

5.5 再生化学プロセス学分野(平沢担当)

本研究分野は、多元物質科学研究所の附属資源変換・再生研究センターの一研究部であり、廃棄物の素材リサイクルや無害化、環境問題にかかわる排ガスなどの有害物質の低減技術などにかかわる研究活動を展開している。とくに、石炭灰やダストなどの酸化物系無機廃棄物および金属含有廃棄物からの、高温プロセスを主体とする化学的手法による素材再生プロセスについて、物理化学およびプロセス工学の観点からの研究を行っている。たとえば、サブオキサイド生成を利用したけい素含有酸化物の高温還元によるSiの回収に関する研究において、石炭灰組成のスラグの炭素熱還元によるSiO₂微粒子の生成挙動と不純物の移行挙動についての基礎研究を行っている。また、有機系廃棄物である廃プラスチックの有効利用および処理に関する研究も視野に入れており、プラスチックと酸化物系廃棄物の組み合わせによる乾式素材再生プロセスに関する研究において、1000℃以下の温度でのプラスチックと酸化物の反応について、無機物、有機物の生成反応挙動について調べている。このほか、反応器からの排ガスのダスト低減に関する基礎研究として、炉内ダストの凝集・浮遊挙動に及ぼす音波印加の影響に関する研究、排ガス中のNO_xの低減に対する音波の利用技術に関する研究などの基礎研究、などを行っている。

5.6 環境材料分析学分野(我妻担当)

本研究分野は、金属材料研究所・分析科学研究部が協力講座として参画しているものである。同研究部は、“素材産業におけるプロセス制御のための新たな機器分析法の開発”を主要課題として研究を推進しており、特に、高性能の固体試料迅速分析法の開発は、最も緊急に解決すべき分析課題として取り組んでいる。鉄鋼業においては、製品の品質管理のためにその元素組成及び不純物の含有量をリアルタイムで分析している。その分析に許される時間は数10秒程度と極めて短く、許容された時間範囲内でできるだけ精度良くしかも低濃度までの分析値を得るため、従来より分析手法の改良が進められてきた。近年、金属素材中に含まれる不純物元素は低減化する傾向にあり、この分野で現在使用されているスパーク放電発光分析法では分析値を得ることが難しい元素が現れ、従来法に代わる新たな高感度分析法が求められている。レーザ誘起プラズマやグロー放電プラズマを励起源とする発光分析法は次世代の工程管理分析法として有力であり、さらなる励起源の特性向上を図り実用分析法としての確立を旨とする研究を推進している。また、近年、資源循環型社会の構築が国家目標として取り上げられており、鉄鋼業においてもこ

の実現に向けてさまざまな研究開発が行われている。とりわけ鋼スクラップ素材の再利用に関しては、鉄鉱石還元と比較してスクラップ利用によりエネルギー消費が1/3程度に節約できること、市中スクラップが100万トン/年の割合で増加していることなどの理由により、強力に推進されるべき課題となっている。鋼スクラップ材にはニッケル、クロム、モリブデン等の高価金属を添加したものがあり、また市中にあるときに銅、スズ、鉛等の再生鋼材の特性を劣化させる元素群が混入する可能性がある。鋼材リサイクル過程における利用効率の向上や再生材の品質保証のために回収素材の高度分別は重要な課題であり、その情報源として構成元素組成を瞬時に提供することができるオンサイト分析法の開発が必要とされる。この分析法に要求される要件は上述のプロセス制御迅速分析法と同等であり、このような視点より、鉄資源循環の各プロセスに組み込むことができる新たな分析方法の設計・研究開発を目指している。

5.7 環境適合材料創製学分野 (一田、藤崎担当)

本研究分野では、鉄鋼メーカーで長年培われた蓄積技術に基づき、製鉄プロセスを応用した廃棄物資源化技術、マルチフィジカル解析技術等をツールとした省エネ高効率プロセスやマテリアルの設計・評価技術、有害物質のIn-situセンシング技術およびセンシング装置開発、等の研究を行う。本研究分野の最大の特徴は、研究活動拠点が鉄鋼メーカーの技術開発部門内に設置されていることである。本研究分野には、上記特徴を最大限に活かしたふたつの使命がある(図2)。ひとつは、実用を意識した環境技術・プロセス技術の習得を主眼にした学生教育である。具体的には、社会・経済システム、法制度、社会インフラを含めた環境事業への取り組み事例の実務者による講義であり、基礎研究だけでなく大規模実験やコスト評価・安全管理等の企業風土を体験できるインターシップ研修や修士研修、博士研修である。もうひとつは、基礎研究の早期社会還元である。大学と鉄鋼メーカーとの活発な人的交流・研究機器の共同利用を通して、環境に適合した

材料・プロセスに関するプロジェクト型共同研究の提案を目指している。

6 おわりに

米国鉄鋼協会 (The Iron&Steel Society) の月刊雑誌「Iron and Steelmaker」には「International Report Japan」と題されたコラムが毎月掲載されており、主に我が国の鉄鋼メーカーにおける技術や設備のトピックスを紹介しているが、2003年6月号の本コラム⁵⁾には興味深い記述が掲載されていた。すなわち、鉄鋼協会第145回講演大会の製鉄、製鋼分野における講演件数を紹介し、製造現場からの報告が少ないことを憂いている反面、ダスト・スラグ処理等のリサイクル関連報告が相対的に多くなっていると述べている。我が国の製鉄、製鋼分野での現場、研究における人員削減が主な理由であろうとの簡単なコメントが示されているが、一方で「エコ」に対する比重が高まっていると感じているように思われる。

図3は、日本鉄鋼協会の講演大会における全講演件数と環境関連研究の報告件数推移を日本金属学会でのトレンドと比較して示したものである。総講演件数には、一般講演に加え

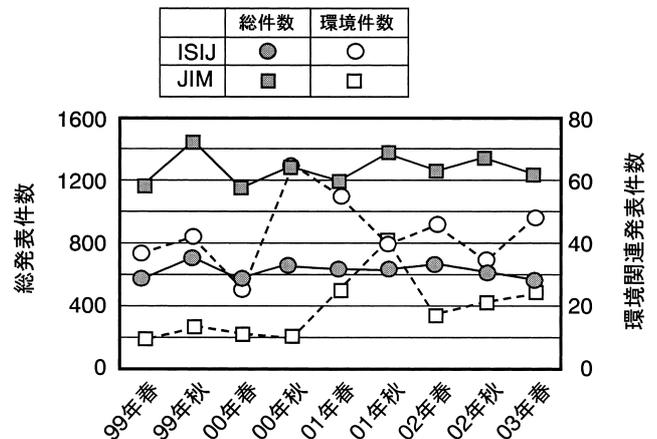


図3 鉄鋼協会と金属学会における環境関連研究報告件数のトレンド⁴⁾

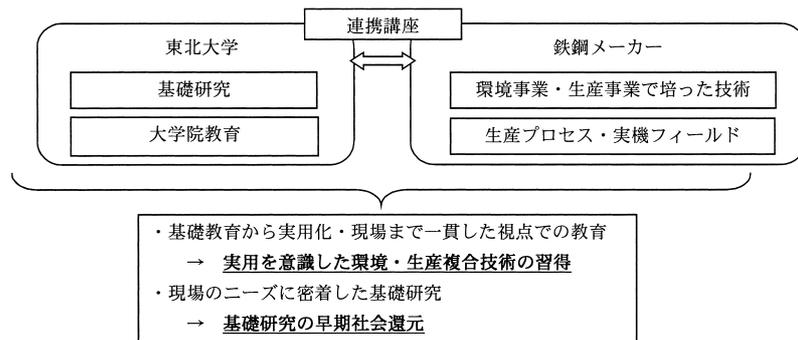


図2 環境科学研究科における鉄鋼メーカー連携講座の使命

て、シンポジウムと討論会での講演件数およびポスターセッションの発表件数が含まれている。どの講演を環境関連テーマとみなしてカウントするか、その定義は難しい。実際はその研究内容が様々な形で環境問題に関連しており、実数はもっと多いと思われるが、ここではおおよそのトレンドをご理解頂くために、講演題目と実際に講演を拝聴した内容を基に、筆者らが独断で分類した。このことをお許し頂いた上で本表を眺めると、次のようなことが言えよう。1) 鉄鋼協会は講演件数が金属学会のほぼ半分で大略一定件数であるが、環境関連テーマは5～10%であり、かなりウエイトが大きい。2) 金属学会では、講演件数は増加傾向にあり、総数も多いが、環境関連テーマは必ずしも多くはなく、3%以下で推移している。鉄鋼業界は、長年培った高温プロセス技術を武器にしたエコビジネスを視野に入れていると考えられ、それがこのトレンドに反映されているのであろう。しかしいずれの学・協会においても、材料科学の持つ能力をもっと積極的に環境の分野に向けてもよいのではないかと思われ、本研究科からも積極的に研究成果を公表していきたいと考えている。

本稿では、従来鉄鋼プロセス工学、鉄鋼材料学、鉄鋼分析科学に従事してきた筆者らが、環境科学に軸足を移し、どのような研究・教育戦略を描いているか、新研究科の理念、組織の説明も交えて概説した。会員各位、特に大学に籍を置く会員の参考情報として頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 東北大学環境科学研究科ホームページ
<http://www.kankyo.tohoku.ac.jp/index-j.html>
- 2) T. Futatsuka, K. Shitogiden, T. Miki, T. Nagasaka and M. Hino : Tetsu-to-Hagane, 89 (2003), 382.
- 3) <http://www.tagen.tohoku.ac.jp/labo/rcsme/rsphsic/index-j.html>
- 4) 長坂徹也, 谷口尚司, 丸山公一, 我妻和明, 戸叶一正 : まてりあ, 42 (2003) 11, 印刷中
- 5) Iron Steelmaker, 30 (2003) 6, 51.

(2003年9月2日受付)