

(独)科学技術振興機構  
戦略的創造研究推進事業  
チーム型研究(CREST)  
追跡評価用資料

研究領域「資源循環型  
エネルギーミニマム型社会」  
(1998-2005)

研究総括 平田 賢

2012年6月15日

# 目次

第1章 調査概要 .....	1
1. 研究領域の概要.....	1
2. CREST 研究後の進展.....	2
(1) 大型ファンドの獲得.....	2
(2) 研究代表者の現況.....	3
(3) 研究領域としての取り組み.....	3
3. CREST 研究の波及.....	4
3.1 科学技術における波及.....	4
3.2 社会経済における波及.....	6
第2章 研究領域及び各研究課題の成果・進展の概要.....	8
研究領域概要 .....	8
各研究課題の成果・進展.....	9
第3章 詳細調査 .....	17
I エネルギーの効率的変換を目指した界面イオン移動.....	17
の解明（研究代表者：小久見善八，1998～2003） .....	17
1. CREST 研究の概要.....	17
2. CREST 研究後 .....	18
3. CREST 研究の波及 .....	22
II 乾燥地植林による炭素固定システム構築（研究代表者：山田興一，1998～2003） ..26	
1. CREST 研究の概要.....	26
2. CREST 研究後 .....	27
3. CREST 研究の波及 .....	28
III 植物系分子素材の高度循環活用システムの構築（研究代表者：船岡正光，1999～2004） .....	32
1. CREST 研究の概要.....	32
2. CREST 研究後 .....	33
3. CREST 研究の波及 .....	34
IV 新規化学結合を用いるシリコン薄膜太陽電池（研究代表者：小林光，2000～2005） .....	42
1. CREST 研究の概要.....	42
2. CREST 研究後の進展.....	42
3. CREST 研究成果の波及 .....	44

# 第1章 調査概要

## 1. 研究領域の概要

「資源循環・エネルギーミニマム型社会」領域は「資源の循環利用とエネルギーの効率的な利用」という観点から戦略目標「環境にやさしい社会の実現」の達成を目指し1998年に設定された。物質である資源は循環させることは可能であるが、エネルギーも循環出来るという誤解が社会で散見されることから、平田賢研究総括は「資源の循環利用」に加え「ミニマムのエネルギーを用いて最大の効果を生む」技術の創出を目指した。

1998年～2000年の三カ年にわたり、領域アドバイザーの協力を得て、17倍以上の倍率となる応募者から16件の研究課題を採択した。研究課題は表1のように“資源循環型システム”と“エネルギーミニマム型システム”に大別される。前者は、フィールド実証型の研究課題が多く、後者は比較的伝統的な工学研究課題が多かった。

これら16件の研究課題の進捗状況の把握や研究推進へのアドバイスのために研究総括、領域アドバイザーは課題あたり5年間の研究期間中に平均2回のサイトビジットを行った。7年間の実施期間に、約1,000報の論文発表（内、国際誌掲載が約780報）、84件の特許出願（内、海外出願は12件）が研究領域から生まれた。

5年間で1研究課題当たり最大総額8億円に上る研究資金はオーストラリアの乾燥地帯で植林可能にした研究のように「実証することが難しかった研究」における実験研究に有効であった。

表1 本研究領域の研究課題

資源循環型システム	
地球温暖化対策	山田興一/乾燥地植林による炭素固定化 福田正己/永久凍土かく乱の抑制技術
資源循環システム	津野洋/都市廃水・廃棄物処理 小名俊博/森林資源リサイクル
製造プロセス	船岡正光/植物系分子素材の高度循環活用システム 馬越淳/高分子形成システム技術
エネルギーミニマム型システム	
燃料電池システム開発	渡辺政廣/高温運転 DMFC 開発

燃料電池要素技術開発	太田健一郎/3次元界面設計 高村仁/天然ガス改質
太陽電池要素技術開発	小林光/新規化学結合の導入
リチウムイオン電池基盤科学	小久見善八/界面イオン移動の説明
コプロダクションシステム構築	堤敦司/コプロダクションシステムの検討
人工光合成システム	井上晴夫/水を電子源とする人工光合成
分散エネルギーシステム	鈴木健二郎/超小型タービン

## 2. CREST 研究後の進展

CREST 研究後、各研究代表者は新たにファンドを獲得して CREST 研究を進展させているが、科研費の獲得状況は本報告書補遺に掲載するに留め、ここでは特に JST や他省庁の比較的大型の研究ファンドの獲得状況について報告する。

### (1) 大型ファンドの獲得

#### (a) JST/SORST

本研究領域から船岡正光氏、井上晴夫氏の 2 件の CREST 研究課題が SORST<sup>1</sup> 研究課題に発展した。船岡正光氏は 2004 年から「植物系分子素材の逐次精密機能制御システム」、一方、井上晴夫氏は 2005 年から「水を電子源とする人工光合成システムの構築」をそれぞれ推進した。

#### (b) JST/CREST

小林光氏は CREST 研究後、大学発ベンチャー推進事業で「欠陥消滅機能を持つ半導体洗浄液の実用化研究」(2004～2006)で CREST 研究の成果の実用化に成功した後、CREST「情報システムの超消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」研究領域(研究総括：南谷崇)で研究課題「極限ゲート構造によるシステムディスプレイの超低消費電力化」(2005～2010)で更に新たな取り組みを行った。

#### (c) JST/ALCA

政府の推進するグリーンイノベーション政策の一環として新たに JST で始まった先端的低炭素化技術開発(ALCA)<sup>2</sup>において、2010 年、小久見チームに参画していた今西誠之氏(三重大)と小林チームに参画していた吉田博氏(阪大産研)が、また 2011 年、小久見チームに参画していた入山恭寿氏(名大)、渡辺チームに参画していた内田裕之氏(山梨大)がそれぞれ ALCA に新規採択された。

<sup>1</sup>戦略的創造研究推進事業等の研究課題のうち、優れた研究成果が期待され、かつ発展の見込まれる研究について、当初の研究期間を越えて切れ目なく研究を継続することで、今後の科学技術の鍵となる大きな研究成果または将来実用化が見込まれる研究成果の創出に資することをねらいとする。

<sup>2</sup>温室効果ガスの削減を中長期にわたって継続的かつ着実に進めていくため、文部科学省が策定する研究開発戦略のもと、新たな科学的・技術的知見に基づいて温室効果ガス削減に大きな可能性を有する技術を創出するための研究開発を推進し、グリーン・イノベーションの創出につながる研究開発成果を得ることを目指す。

#### (d) 他の公的プログラム

環境省関連の研究プログラムでは、山田興一氏が地球環境研究総合推進費「陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発—大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策—」（2003~2006）、船岡正光氏が「バイオマス・循環資源低炭素化技術開発分野領域 I グリーンイノベーション推進実証研究領域」において技術開発課題「相分離変換法を用いた木質バイオマスの全量活用型低コストエタノール製造技術実証研究」（2011~2013）を行った。

また、(独)日本学術振興会による最先端・次世代研究開発支援プロジェクト（グリーン・イノベーション）において、高村仁氏が「高速酸素透過膜による純酸素燃焼イノベーション」（2011~2014）を推進している。

この他、経産省・NEDOによる研究プロジェクトにおいてもポスト CREST となる研究が数多く推進されているが、これらについて社会経済への波及事例として後述(3.2(1))する。

#### (2) 研究代表者の現況

CREST 研究当時に助教授（准教授）であった堤敦司氏は 2007 年に東大生研教授、高村仁氏は 2011 年に東北大院工学研究科教授にそれぞれ昇任し、研究室を主宰している。

渡辺政廣氏は 2008 年に新設された山梨大学燃料電池ナノ材料研究センターのセンター長に、小久見善八氏は 2009 年の京都大学を退官した後、京都大学産官学連携本部特任教授に、太田健一郎氏は 2011 年、横浜国大グリーン水素研究センターの特任教授にそれぞれ着任した。津野洋氏は 2011 年度を以て京都大学を停年退官した。

山田興一氏は東大理事、東大総長室顧問を歴任した後、現在、JST に新設（2009 年）された低炭素社会戦略センター副センター長を務めている。安井至氏は JST 研究開発戦略センター上席フェロー（2008 年～2009 年）を務めた後、2009 年 4 月より製品評価技術基盤機構（NITE）理事長を務めている。福田正己氏は 2007 年からアラスカ大学国際北極圏研究センター教授を務めた後、現在、福山市立大学都市経営学部都市経営学科の教授を務めている。尚、鈴木健二郎氏と生島豊氏は 2007 年に逝去された。

#### (3) 研究領域としての取り組み

2008 年 5 月 30 日に東北大学片平さくらホールで元研究代表者たちによって自発的に CREST 研究後の進捗や取り組みを報告する会「フォローアップシンポジウム CREST『資源循環・エネルギーミニマム型システム技術』の新展開—環境調和型社会を目指して—」が開催された。元研究総括の平田賢氏、技術参事として研究領域を支えた戸戸一陽氏も出席した。

### 3. CREST 研究の波及

#### 3.1 科学技術における波及

##### (1) JST 戦略創造研究推進事業への波及

本研究領域の研究代表者が JST 戦略的創造研究推進事業の研究総括に就任したケースが 2 例あった。2008 年に安井至氏が CREST 「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」研究領域、2009 年に井上晴夫氏がさきがけ「光エネルギーと物質変換」研究領域の研究総括にそれぞれ就任した。

一方、他の研究領域の領域アドバイザーに就任した例としては、小久見善八氏が「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」（研究総括：安井至）、井上晴夫氏が「エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製」（研究総括：藤嶋昭）、津野洋氏が「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」（研究総括：大垣眞一郎）の領域アドバイザーをそれぞれ務めている事例が挙げられる。

また、他の CREST の研究代表者になった例もあった。小林光氏は 2004 年～2006 年大学発ベンチャー推進事業の開発代表者として「欠陥消滅機能を持つ半導体洗浄液の実用化研究」を推進した後、2005 年から CREST 「情報システムの超消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」研究領域（研究総括：南谷崇）で研究課題「極限ゲート構造によるシステムディスプレイの超低消費電力化」を行った。

CREST 研究に参画していた研究者が ALCA 研究代表者になった事例もあった。2010 年、小久見チームに参画していた今西誠之氏（三重大）と小林チームに参画していた吉田博氏（阪大産研）が、また 2011 年、小久見チームに参画していた入山恭寿氏（名大）と渡辺チームに参画していた内田裕之氏（山梨大）がそれぞれ ALCA に新規採択された。

以上の人的な拡がりを図示したものの下図（図 1）である。

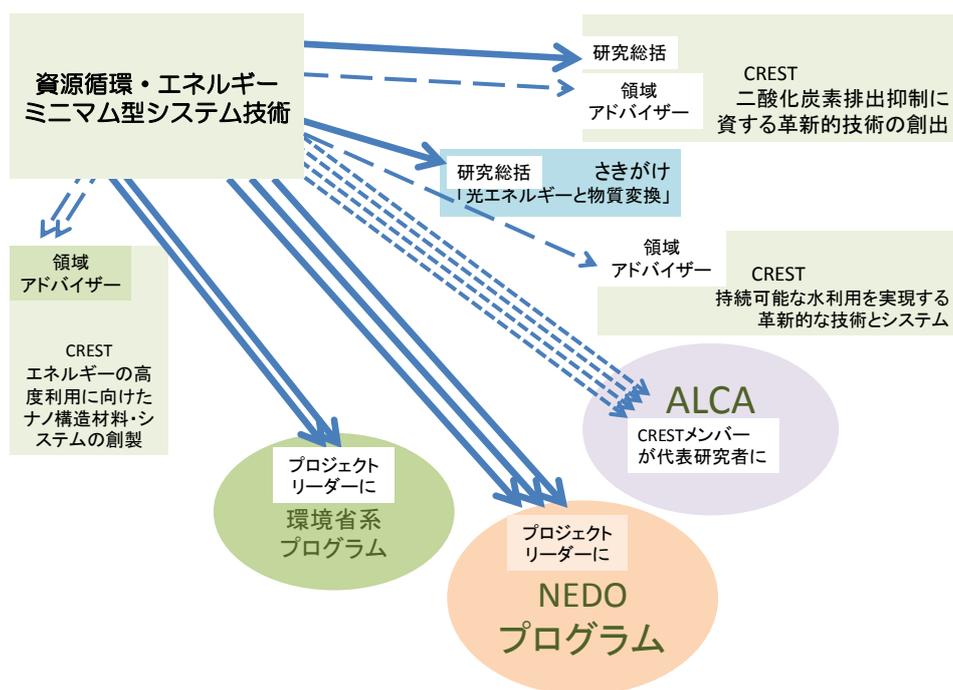


図1 本研究領域からの拡がり

## (2) 研究センターの設立

所属機関である大学で研究センターが設立され、CREST の元研究代表者がセンター長などに就任したケースも3例あった。2008年には堤敦司氏が東京大学エネルギー工学連携研究センター、渡辺政廣氏が山梨大学燃料電池ナノ材料研究センターのセンター長にそれぞれ就任した。また、2011年には、横浜国大の中に「グリーン水素研究センター」が設立され、太田健一郎氏は特任教授に着任した。

## (3) 科学技術に関する賞

本研究領域の元研究代表者のCREST研究後の主な受賞についてまとめた。

環境技術に関して、次のような賞を授与された：

- 日経地球環境技術賞：船岡正光(2004)
- 2004 GSC 賞／経済産業大臣賞：生島豊 (2004)
- 日本水環境学会学術賞：津野洋 (2007)

また、学術に関して、次のような賞が授与された：

- 電気化学会賞・武井賞：渡辺政廣(2005)，小久見善八(2006)
- 触媒学会賞(学術賞)：渡辺政廣(2007)

この他、渡辺政廣氏が、平成20年度科学技術分野の文部科学大臣表彰の科学技術賞(開発部門)を受賞した。

## 3.2 社会経済における波及

### (1) 応用研究プロジェクト・ベンチャー起業

経産省の NEDO プロジェクトを推進しているケースが 4 事例あった。小久見善八氏は、2009 年 10 月から NEDO による革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（通称ライジング）のプロジェクトリーダーとして事業を統括している。また、渡辺政廣氏は 2005 年から燃料電池の高信頼性・高性能化につながる NEDO「燃料電池可視化プロジェクト研究」（2005～2010）を実施し、2007 年には「固体高分子形燃料電池内の酸素濃度分布の可視化システム」の開発に世界で初めて成功した。2008 年からは、燃料電池の本格普及に資することを目的として、NEDO「HiPer-FC(High Performance Fuel Cell)プロジェクト」（2008～2015）を推進している。太田健一郎氏は 2008 年からプロジェクトリーダーとして NEDO「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発/要素技術開発/酸化物系非貴金属触媒の研究開発」を推進した。堤敦司氏は CREST 研究で提唱した A-IGCC の要素開発の位置づけとして 2006 年から NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」の中で「次世代高効率石炭ガス化技術開発」を推進し、更に 2012 年、NEDO「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」において新日鉄エンジニアリング株式会社と共同でバイオエタノール製造に必要なエネルギーを大幅に削減することに成功、世界で初めて自己熱再生理論を実証した。この他、高村仁氏は、NEDO「水素貯蔵材料先端基盤研究事業（Hydro☆Star）」で「水素貯蔵材料における M-e-H 間相互作用の NMR 分光解析」を行った。

NEDO プロジェクト以外では、2003～2007 年、渡辺政廣氏が「産業活性化のためのリーディングプロジェクト」の一環として「次世代燃料電池の研究」プロジェクトを企業数社と連携して推進し、燃料電池にとって有用な新規高分子電解質膜から水素製造/精製触媒まで幅広い材料開発・研究で重要な成果を挙げた。

ベンチャー企業の事例としては、2007 年、小林光氏が CREST で開発した欠陥消滅型半導体洗浄法をコア技術とする大学発ベンチャー（株）KIT を起業したことが挙げられる。

### (2) 地方自治体・海外からの引き合い

船岡教授の考案した植物資源変換システムは国内外からの引き合いも多い。2.(2)で言及した環境省のプロジェクトの一環で徳島県那賀町に 4 号機プラントが完成し試運転を開始している。この船岡教授のプロセスは EU でも FUNAOKA Process として知られ、特に森林資源が豊かなフィンランドから注目されている。また、油ヤシの空房の有効利用として着目したマレーシアも注目している。山田興一氏の行った CREST 研究は現在もオーストラリア政府が注目している。

### (3) 日本の科学技術政策との関連

本 CREST 研究領域を設定した当時（1998 年）は環境問題として“地球温暖化”や“内分泌かく乱物質”などがキーワードになっており、本研究領域も「地球温暖化抑止」を念頭に設定・運営された。2000 年以降、日本の科学技術政策においては“循環型社会の形成”、“低炭素社会の実現”、“グリーンイノベーションの創出”など時代の要請に応じて環境分野のキーワードを変遷させてきており、JST もまた**低炭素社会研究センター**を設立（2009 年）し、またいくつかの低炭素社会実現に向けた研究領域を設定して呼応してきた。同センターの副センター長に山田興一氏が就任したり、安井至氏、井上晴夫氏が低炭素社会実現に向けて設定された研究領域の研究総括にそれぞれ就任したりしたことは、本研究領域が環境分野において源流の一つになっていたことを示している。

### (4) 現代のエネルギー問題への貢献

東日本震災の影響もあり、エネルギーの安定供給や再生エネルギーシステムに関する研究開発が再び脚光を浴びてきた。自然エネルギー利用としてよく知られている太陽電池に関しては、小林光教授の CREST 研究の成果を基に、反射防止膜のない太陽電池においてエネルギー変換効率が 10%から 13%以上に高効率化したり、太陽電池製造工程の低コスト化につながる洗浄法が開発されたりしており、産業界との連携も進んでいる。

小久見教授がプロジェクトリーダーを務める前述の NEDO **革新型蓄電池先端科学基礎研究事業**では、2009 年度から 7 年で総額 210 億円が投じられ、トヨタ自動車や日産自動車など 12 社と京都大学など 10 研究機関が参加し、新聞などメディアの関心も高い。CREST 研究で脈々と取り組んできた“蓄電池の事象解析”の延長上にあり、CREST で蓄積された知見や人材が有形無形にこの事業の基盤となっている。燃料電池に関しても渡辺政廣教授、太田健一郎教授は NEDO プロジェクトのリーダーや大学内に形成した研究拠点のセンター長を務めるなど産学連携の主導的な存在となっている。

このように、エネルギー問題に対する社会のニーズが俄然高まる中で、本研究領域の研究成果から産業界へ貢献しつつあるものも現れてきている。

# 第 2 章 研究領域及び各研究課題の 成果・進展の概要

## 研究領域概要

### (1)戦略目標「環境にやさしい社会の実現」

地球上の人口は現在約 5.8 億人であり、1970 年を境に増加は減速しつつあるものの、依然として年率 1.5 % で増加しており、2025 年には 8.3 億人、2050 年には 98 億人に達すると予想されている。今後人類が、真に豊かで快適な生活を実現し、維持していくためには、地球規模での無制限な開発や化石燃料の過剰使用等による環境の破壊を来すことなく、必要な食料及びエネルギーを確保するとともに、種々の人間活動やその結果生じる廃棄物等の生態系への影響を極力低減していくことが重要である。近年顕在化してきた内分泌かく乱物質の問題については、科学的に不明な点が数多く残されており、早急に知見を集積し、必要な対策を立てていくことが重要である。

このためには、地球規模の諸現象の解明とその予測を行うとともに、これらを基礎として人間の諸活動の環境への影響を正確に把握することや、環境保全関連技術の確立、内分泌かく乱物質の生体への影響の把握が不可欠であり、それらを踏まえて環境にやさしい社会を構築していくことが必要である。

したがって、戦略目標を、地球変動のメカニズムの解明とその予測、環境への影響の把握、環境保全関連技術の確立、内分泌かく乱物質の生体への影響メカニズムの解明等により人間の諸活動の環境への負荷の低減を目指す「環境にやさしい社会の実現」とする。

### (2)研究領域概要

大量資源消費型文明社会を是正し、持続的発展を可能とする社会を構築するため、地球温暖化等の環境問題を克服し、資源循環・エネルギーミニマム型システムの構築を目指す研究を対象とするものです。

具体的には、長期的な観点から、産業から民生に至る地球温暖化ガス放出を抑制する新たな技術の探索、生物機能を利用した水素等エネルギー源創生、温暖化ガスの固定・分解等に関する研究、また、資源循環・エネルギーミニマム型システム構築のために必要とな

る製品設計技術や製造技術等に関する革新的な研究等が含まれます。また、環境問題は社会システムとも密接な関係があるため、総合システム技術に関する研究も含まれます。

#### 研究統括

平田 賢 (芝浦工業大学 客員教授)

#### 領域アドバイザー

有賀祐勝 (東京農業大学 教授)

石井吉徳 (富山国際大学 教授)

垣田行雄 ((財)日本システム開発研究所 専務理事)

片岡宏文 (東京ガス (株) 特別参与)

木谷 収 (日本大学 教授)

中上英俊 (㈱住環境計画研究所 所長)

平岡正勝 (立命館大学総合理工学研究機構 エコ・テクノロジー研究センター センター長)

三井恒夫 (元東京電力㈱最高顧問)

#### 各研究課題の成果・進展

##### 平成 10 年度採択分

#### 研究課題

#### エネルギーの効率的変換をめざした界面イオン移動の解明

#### 研究代表者(所属)

小久見善八 (京都大学大学院工学研究科 教授)

#### 概要

リチウム二次電池、燃料電池などの電気化学的エネルギー変換デバイスの高効率化に向けて、界面で起こるイオンダイナミクス of 解明を目的とした。固体、液体、気体の関与するエネルギー変換界面で起こる反応の素過程を実験的、理論的手法を用いて調べ、界面反応の速度を決定する要因を明らかにすることにより、ハイブリッド自動車用電源などの高出力型エネルギー変換デバイスの開発指針を得た。

CREST 研究後は第 3 章参照。

#### 研究課題

#### 高リサイクル性を有する森林資源の開発

#### 研究代表者(所属)

小名俊博 (九州大学大学院農学研究院 助教授)

#### 概要

リサイクルによるパルプ繊維の劣化と損失を原料から改善するため、高リサイクル性かつ高成長性を有した樹木を迅速に同定・選抜する技術及びその自動化装置の開発に成功した。選抜、交雑、植林を繰り返すことにより、各種特性をさらに向上させる可能性を証明した。森のリサイクルと紙のリサイクルを一体化することにより、大気中 CO<sub>2</sub> の固定量を増加し、省エネルギーを達成しながらパルプ繊維を通じて、資源循環型社会の実現が可能であることが判明した。

CREST 研究後、JST 重点地域研究開発推進プログラム（育成研究型）（2004～2006 年）、同（研究開発資源活用型）（2006～2009 年）では、表面プラズモン共鳴と生がん細胞を利用し、がん細胞表面のみに作用しアポトーシスを起こす薬剤（効果）を迅速にスクリーニングする手法を開発させ小型化し、患者から採取した少量細胞を用い迅速に現場でがん細胞の判別、並びに治療法（各患者向け薬剤）を決定することが可能な超高感度ポータブル型ナノデバイス複合システムの開発を行った。

#### 研究課題

#### 温暖化ガスにかかわる永久凍土攪乱の抑制技術

#### 研究代表者(所属)

福田正己（北海道大学低温科学研究所 教授）

#### 概要

シベリア永久凍土では森林火災やパイプライン敷設などの永久凍土攪乱に起因して、二酸化炭素やメタンガスが放出している。これらの温暖化ガス放出を抑制するために、森林火災の発生実態現地観測を実施し、現状では、シベリアタイガが温暖化ガスの吸収源ではなく、発生源であることを確認した。また衛星画像解析による火災の早期検知・延焼予測システムを確立し、火災の抑制によって、二酸化炭素発生量を軽減させることが可能となった。併せて現地実規模実験結果によって、パイプライン敷設建設の安全指針を提案した。

2007 年からアラスカ大学国際北極圏研究センター 教授。2010 年にアラスカ大学を退職し、福山市役所大学設置準備特別研究員に就任。2011 年 4 月より福山市立大学教授。

#### 研究課題

#### エネルギーミニマム型高分子形成システム技術の開発

#### 研究代表者(所属)

馬越淳（（独）農業生物資源研究所 特待研究員）

#### 概要

生物はエネルギーを極めて有効に利用し、その成分である高分子の製造を行なっている。生物が作る高分子の構造形成のメカニズムを解明した。カイコや樹木プロトプラストは巧みな方法で高分子鎖を精密に配列制御して、イオンを用いて構造形成を行なっていることを明らかにした。カイコやクモが糸を作る時、大気中から CO<sub>2</sub> を取り込んでいることを世界で初めて明らかにした [1]。従来、大気中の CO<sub>2</sub> を利用できるのは植物、光合成細菌と一部の微生物だけと考えられており、生物学、昆虫学界にとって画期的な発見となった [2]。現在では（独）農業生物資源研究所新機能素材研究開発ユニットが、生物素材としてシルクタンパク質に注目して、医療用分

野やコスメティック分野等の産業分野で利用できる新素材の研究を行っている。

[1] Magoshi, J. et al, *Biomacromolecules*, 4, 3, 778, 2003

[2] 馬越芳子ら, *J. of the Soc. of Japanese Women Scientists*, 11, 1, 29, 2010

#### 研究課題

#### 乾燥地植林による炭素固定システムの構築

#### 研究代表者(所属)

山田興一 (信州大学繊維学部 教授)

#### 概要

研究目的は乾燥地における持続的植林による炭素固定システム構築である。主研究対象地として西オーストラリア、レオノラ(年間降雨量 230mm)を選び、50km 四方の実験地を設定した。そこで土壌、樹木、気象に関する広範な調査を行うとともに、乾燥地緑化のための集水、土壌構造改良、樹種選定手法を提案し、実証実験を行った。その結果炭素固定効率が 40 倍のシステムが開発された。固定コストは約 15,000 円/t-C、西オーストラリアでの炭素固定ポテンシャルは 6 億 t-C 程度であると推算された。

CREST 研究後は第 3 章参照。

### 平成 11 年度採択分

#### 研究課題

#### 機能環境流体を利用した資源循環・低エミッション型物質製造プロセスの創製

#### 研究代表者(所属)

生島豊 ((独)産業技術総合研究所超臨界流体研究センター 副センター長)

#### 概要

CREST 研究では、超臨界水や超臨界二酸化炭素が温度・圧力によって容易に種々の機能を引き出せる特性に着目し、反応場への新展開や反応基質、触媒としての可能性を追究した。“超臨界水マイクロリアクションシステム”を新たに開発し、マイクロ空間の超臨界水反応場への適用が顕著な抑制効果、目的物の高選択的、高速合成に結びつくことを明らかにした [1-2]。

CREST 研究後、超臨界水を反応場とする有機合成反応を更に展開させた。例えば反応促進のために Pd 触媒が必須とされてきた Heck 反応において、生島らは初めてスチレンとヨウ化ベンゼンのカップリング反応が超臨界水中では触媒を用いなくても促進させれる事実を見出すなど、超臨界水そのものが反応を顕著に促進するための酸・塩基機能を示し副反応も抑制できることを実証した [3]。

2005 年には、生島氏が所属していた産総研超臨界流体研究センターはコンパクト化学プロセス研究センターとなり、超臨界水や超臨界二酸化炭素を利用した研究を推進している[4]。また、同年、生島豊氏らが研究開発した「超臨界流体を利用した環境調和型化成品製造技術の創成」は第 4 回グリーンサステイナブルケミストリー(GSC)賞経済産業大臣賞を受賞した。

- [1] Y.Ikushima et.al., Chem, Cimmun., 2208, 2002
- [2] Y.Ikushima et. al., Chem. Eng. Sci., 58, 935, 2003
- [3] 生島豊, 佐藤正大, ケミカル・エンジニアリング, 2, 89, 2007
- [4] [http://unit.aist.go.jp/ccs/031\\_ccs-cse.html](http://unit.aist.go.jp/ccs/031_ccs-cse.html)

研究課題

超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム

研究代表者(所属)

鈴木健二郎 (芝浦工業大学エネルギーフロー研究センター センター長)

概要

固体酸化物形燃料電池とガスタービンのハイブリッドシステムに着目して, 超小型化 (～30kW) による分散電源ユニットとしての可能性を示し, SOFC, マイクロ燃焼器などの要素機器の設計指針用データベースを構築した. 尚, 鈴木氏は2007年にご逝去された.

研究課題

植物系分子素材の高度循環活用システムの構築

研究代表者(所属)

船岡正光 (三重大学生物資源学部 教授)

概要

生態系において完全循環系を形成している植物体を機能性分子に切り替える要素技術として, 新たに常温, 常圧で機能する相分離系変換システムを開発した. さらに, 天然リグニンの長期循環機能を生かす新規リグニン系素材 (リグノフェノール) を設計, その機能的な循環活用システムを提示した.

CREST 研究後は第3章参照.

研究課題

社会的受容性獲得のための情報伝達技術の開発

研究代表者(所属)

安井至 (国際連合大学 副学長)

概要

トレードオフの記述が可能なライフサイクルアセスメントを仲介として, 市民社会へ「情報そのもの」と「情報を理解するスキル」とを同時に伝達することによって, 真に優れた環境技術が受容されるような社会を形成できると考え, 技術開発とその実証を行った.

研究課題

高温運転メタノール直接型燃料電池の開発

研究代表者(所属)

渡辺政廣 (山梨大学クリーンエネルギー研究センター センター長)

概要

CREST 研究では, 電池の高性能化, 高品位廃熱利用が可能な高温作動 (～150℃) DMFC の

実現に向け、高性能アノード、カソード合金触媒の設計・評価と反応機構解明、メタノールクロスオーバー抑制型電解質膜、高温作動型電解質膜の開発を実施し、新型膜/電極接合体の作成・試験に成功した。

2003～2007年、「産業活性化のためのリーディングプロジェクト」の一環として「次世代燃料電池の研究」プロジェクトを企業数社と連携して推進し、燃料電池にとって有用な新規高分子電解質膜から水素製造/精製触媒まで幅広い材料開発・研究で重要な成果を挙げた。また、2005年から燃料電池の高信頼性・高性能化につながる NEDO の「燃料電池可視化プロジェクト研究」(2005～2010)を実施し、2007年には「固体高分子形燃料電池内の酸素濃度分布の可視化システム」の開発に世界で初めて成功した [1]。2008年からは、燃料電池の本格普及に資することを目的として、NEDO の HiPer-FC(High Performance Fuel Cell)プロジェクト<sup>3</sup>(2008～2015)を推進している。このプロジェクトでは2008年に新設された燃料電池ナノ材料研究センター(センター長:渡辺政廣)を中心として劣化機構解析や高性能・低コストな触媒、電解質膜、MEA等の研究開発を進めている。2010年1月には鳩山首相(当時)らが同センターを視察した [2]。

[1] [http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_0338A.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_0338A.html)

[2] <http://www.yamanashi.ac.jp/modules/information/index.php?page=article&storyid=299>

## 平成 12 年度採択分

### 研究課題

#### 水を電子源とする人工光合成システムの構築

#### 研究代表者(所属)

井上晴夫 (首都大学東京都市環境学部 学部長)

#### 概要

地球温暖化の主因とされる二酸化炭素を還元し化学的に固定するために必要な電子源として水分子はエネルギー、物質循環の両面から理想的であるが、CREST 研究に先立ち研究代表者らは、金属錯体に可視光を当てることによって水分子から電子を取り出すことを見出した [1]。この発見を足掛かりに CREST 研究を推進し、高効率の光酸化還元物質変換系の構築に成功し、水分子の金属錯体上での活性化される分子機構を主に中間体の直接検出により明らかにした。更に、二酸化炭素が高効率で光還元される反応系も見出した。CREST 研究後は、SORST 研究において人工光合成系を構築するための化学反応場の設計と合成に取り組み、水を電子源とする光増感酸化反応の効率化や二酸化炭素光還元系触媒の開発で特に優れた成果を挙げた。

人工光合成の研究分野は米エネルギー省(DOE)が 2010 年から 5 年間にわたり約 120 億円を投じる研究を始めるなど海外で研究推進の動きが活発になっており、日本では井上氏が中心になって主要な研究者らによる「人工光合成フォーラム」を設立した。また、井上氏は 2009 年よりさ

<sup>3</sup> プロジェクトの正式名称は「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発事業/劣化機構解析とナノテクノロジーを融合した高性能セルのための基礎的材料研究」。

きがけ「光エネルギーと物質変換」領域の研究領域を務め、太陽光による広義の物質変換を介して光エネルギーを化学エネルギーに変換・貯蔵・有効利用し得る高効率システムの構築を目指した研究を推進している。

[1] T.Shiragami, et al., J. Am. Chem. Soc., 118, 6311, 2003

#### 研究課題

#### 電気化学エネルギー変換の擬似三次元界面設計

#### 研究代表者(所属)

太田健一郎 (横浜国立大学大学院工学研究院 教授)

#### 概要

CREST では、電気化学エネルギー変換システムである固体高分子形燃料電池の本格普及のために、酸素極の白金代替触媒の開発と反応抵抗の減少を目的とした擬似三次元界面設計を行った。数多くの遷移金属炭化物・酸窒化物・酸化物が酸素還元触媒となることを見出した。また、熱分散緩和法や光照射法などの新しい手法を用いて、擬似三次元界面による高効率化を達成し、白金使用量の大幅な削減が可能となることを見出した。

CREST 研究後もIV族及びV族元素の酸化物をベースとした触媒の開発を進め [1]、これらの非白金触媒の開発を加速するために、2008年から太田氏をプロジェクトリーダーとしたNEDO「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発/要素技術開発/酸化物系非貴金属触媒の研究開発」において、横国大、東大、日本電気(株)、パナソニック(株)、日産自動車(株)、(株)アライドマテリアル、昭和電工(株)、住友化学(株)、太陽化学(株)、凸版印刷(株)、新日本石油(株)の参画のもとに研究開発が推進された。酸素還元開始電位の目標値1.0Vを2009年にほぼ達成した[2]。2011年、低炭素社会への動きに鑑み、横浜国大の中に「グリーン水素研究センター」が設立され、太田氏は特任教授に着任した。

[1] 太田健一郎, 石原顕光, 表面化学, 29.10.586,2008

[2] 太田健一郎, 石原顕光, PETROTECH, 33,7,495,2010

#### 研究課題

#### 新規化学結合を用いるシリコン薄膜太陽電池

#### 研究代表者(所属)

小林光 (大阪大学産業科学研究所 教授)

#### 概要

半導体中の欠陥準位を消滅させる新規方法として、半導体を KCN や HCN 溶液に浸漬して、CN<sup>-</sup>イオンを欠陥準位に選択的に反応させ Si-CN 等の結合を形成する方法を開発した。新規欠陥消滅法を用いて、種々のタイプのシリコン太陽電池の変換効率をかなり向上させることに成功した。Si-CN 結合は、800°Cの熱処理や放射線照射によって切断されないことがわかった。

CREST 研究後は第3章参照。

#### 研究課題

#### 家庭用燃料電池実現のための新たな高効率天然ガス改質システムの構築

#### 研究代表者(所属)

高村仁 (東北大学大学院工学研究科 助教授)

#### 概要

CREST 研究では、新しい水素の製造方法として“酸素透過性セラミックスを利用した部分酸化法”に着目し、高速酸素透過膜の開発やそれを用いた改質モジュールの試作を実施した。CREST 研究後、メタンからの水素製造を目的としたセリア系酸素透過膜の開発が進み、これまでに 500 時間を超える長時間作動が検証され、企業との共同研究が展開されている [1] また、新たな展開としてセリアナノ粒子の高速イオン伝導現象や新規イオン伝導体の開発についての研究を進めている。2011 年から最先端・次世代研究開発支援プロジェクト (グリーン・イノベーション) において「高速酸素透過膜による純酸素燃焼イノベーション」を推進している。

[1] フォローアップシンポジウム CREST「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」の新展開, 2008

#### 研究課題

コプロダクションによる CO<sub>2</sub> フリーなエネルギー・物質生産システムの構築

#### 研究代表者(所属)

堤敦司 (東京大学大学院工学系研究科 助教授)

#### 概要

既存のエネルギー・物質生産体系を見直し、エネルギーと物質のコプロダクション化を図ることによって、エネルギーと物質の消費を極力抑え、環境汚染物質を一切排出しない新たなエネルギー・物質生産体系を構築することができる。CREST 研究では、エクセルギー再生によるバイオマスからの水素と炭素のコプロダクションプロセスの開発を行った。また、水素と電力をコプロダクションする次世代石炭ガス化複合サイクルシステム (A-IGCC/IGFC) を提案した。さらに、産業部門における化学品とエネルギーのコプロダクション化を目指して、エネルギー・物質生産システムにおいて、エクセルギー損失を最小にする、エネルギーインテグレーションによる新しいプロセス創生手法・評価手法を開発した。

CREST 研究で提唱した A-IGCC の要素開発の位置づけとして 2006 年から NEDO「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」の中で「次世代高効率石炭ガス化技術開発」を推進している。また、堤氏は、燃料を燃焼させて熱を発生させ加熱していた従来プロセスに対して、一切加熱することなく自己熱を循環利用する省エネルギーなプロセス設計理論である「自己熱再生理論」を構築した [1]。2012 年、NEDO「セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業」において新日鉄エンジニアリング株式会社と共同でバイオエタノール蒸留プロセスに適用し、バイオエタノール製造に必要なエネルギーを大幅に削減することに成功、世界で初めて自己熱再生理論を実証した [2]。

2008 年、東京大学では、人文系、社会科学系も含めたエネルギー関連研究ネットワークを発足させ、さらにエネルギー・環境問題の解決に不可欠な革新的な技術の創成を目指し、生産技術研究所と工学系研究科が共同でエネルギー工学連携研究センターを設立した。堤氏はそのセンタ

一長に就任している。

[1] Kansha, Y., Tsuru, N., Sato, K., Fushimi, C., Tsutsumi, Industrial and Engineering Chemistry Research, 48 (16), 7682, 2009.

[2] [http://www.u-tokyo.ac.jp/public/public01\\_240202\\_j.html](http://www.u-tokyo.ac.jp/public/public01_240202_j.html)

#### 研究課題

資源回収型の都市廃水・廃棄物処理システム技術の開発

#### 研究代表者(所属)

津野洋 (京都大学大学院工学研究科 教授)

#### 概要

CREST では、生ゴミと汚泥とを同時に処理する一元化下水道を提案し、それらを支える技術（ディスポーザ、下水道の途中での固定物回収とその効率的メタン発酵並びに生物膜ろ床高度処理反応器、余剰汚泥減量化、燐回収型高度処理など）の開発を行った。2004 年度後半より、埼玉県の染色工場及び愛知万博会場内にて、産業及び一般廃水を対象とした実証試験を実施した [1]。CREST 研究後、超高温メタン発酵工程を開発するために生ごみ及び下水汚泥を対象とした実験室規模の連続実験を行い、その処理特性を評価しながら分子生物学的な技術を用いて微生物群集の解析を試みた [2]

[1] [http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ\\_00240.html](http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00240.html)

[2] 津野, 環境資源工学, 56, 4, 182, 2009]

(\*所属機関・役職名は研究終了時点)

## 第3章 詳細調査

本領域の研究課題の中から資源循環型研究課題として、「乾燥地植林による炭素固定システム構築（研究代表者：山田興一，1998～2003）」、「植物系分子素材の高度循環活用システムの構築（研究代表者：船岡正光，1999～2004）」，エネルギーミニマム型研究課題として「エネルギーの効率的変換を目指した界面イオン移動の解明（研究代表者：小久見善八，1998～2003）」、「新規化学結合を用いるシリコン薄膜太陽電池（研究代表者：小林光，2000～2005）」について詳細な事例調査を行った。

### 1. エネルギーの効率的変換を目指した界面イオン移動の解明（研究代表者：小久見善八，1998～2003）

#### 1.1 CREST 研究の概要

ハイブリッド車（HEV）や電動工具などの用途においては，高出入力特性すなわちハイレート充放電の特性が重要となる [1]．従って，電池のような電気化学的エネルギー変換反応では，電極/電解質の界面反応を明らかにすることは極めて重要な意味を持つが，従来は構造解析の研究が主流を形成し，界面のダイナミクスに関する研究も界面電子移動の視点からのものが多く，界面におけるイオン移動に取り組んだ研究は CREST 研究開始当初は殆ど例がなかった [2]．このような背景から，CREST 研究では，リチウムイオン電池の起電反応を電極相と電解質相の間をリチウムイオンが横切る“界面イオン移動”反応として捉え，速度論的な解析から界面イオン移動反応が律速段階となることを明らかにした．一方，燃料電池では固体酸化物形燃料電池（SOFC）の混合導電体電極の反応を電子移動とイオン移動とに分離して反応の律速段階を解明する中で，表面反応が律速となることを明らかにした．

本 CREST 研究では、実用に際して問題となることが予測される“電気化学的エネルギー変換デバイスにおける界面イオン移動の遅れ”について、これらを克服するための界面設計指針をその速度決定因子を明らかにすることによって提案することができた。今後、ハイブリッド自動車用などの高出力特性が要求されるリチウムイオン電池の開発や高出力密度燃料電池の研究開発に活かされていくことが期待される。

## 1.2 CREST 研究後

### (1) 研究の進展

小久見教授は 2009 年 3 月、京都大学大学院工学研究科 物質エネルギー化学専攻を退官し、同年より京都大学産官学連携本部 特任教授（京都大学 名誉教授）に就任し、京都大学に研究拠点を置く革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（通称：RISING（ライジング）事業）のプロジェクトリーダーとして研究を推進している（後述）。CREST 研究にも参画した安部武志教授が 2009 年 4 月から京都大学で研究室を主宰しており、CREST 研究の進展として主に安部教授の最近の研究動向 [3] について調べた。

### (1) 電極 / 電解質 界面のリチウムイオン移動

安部研究室では電極/電解質界面でのリチウムイオン移動に着目した研究に取り組んでおり、界面で起こるリチウムイオン移動に大きな活性化障壁が存在することを明らかにした。また、その活性化障壁が溶媒の脱離、すなわちリチウムイオンの脱溶媒和に起因することを見出した。

- ▶ Solvated Lithium Ion Transfer at Interface between Graphite and Electrolyte  
Abe T, Fukuda H, Iriyama Y, and Ogumi Z  
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 151(8), A1120-A1123 (2004).
- ▶ Lithium-ion Transfer at the Interface between Electrolyte / Non-graphitizable Carbon Electrode  
Doi T, Miyatake K, Iriyama Y, Abe T, and Ogumi Z  
CARBON, 42 (15), Pages 3183-3187 (2004).
- ▶ Lithium Ion Transfer at Interface between Lithium-Ion-Conductive Solid Crystalline Electrolyte and Polymer Electrolyte  
Abe T, Ohtsuka M, Sagane F, Iriyama Y, and Ogumi Z  
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 151(11), A1950-A1953 (2004).
- ▶ Effects of Surface Modification by MgO on Interface Reactions of Lithium Cobalt Oxide Thin Film Electrode  
Iriyama Y, Kurita H, Yamada I, Abe T, and Ogumi Z

## (2) 全固体薄膜電池

現行のリチウムイオン二次電池には有機電解質が使われており、安全性の面で電池の難燃性が求められていることから、有機電解質ではなく無機固体電解質を使う全固体電池が期待される。しかしながら、液体と固体の接触よりも固体と固体の接触は抵抗が大きく、固体電解質と電極の間には良好な接触が不可欠であり、安部研究室では薄膜電極と薄膜固体電解質からなる全固体薄膜電池を作製し、固体電解質と電極の界面に着目した研究を進めている。

- ▶ Electrochemical Properties of Graphitized Carbonaceous Thin Films Prepared by Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition  
Abe T, Takeda K, Fukutsuka T, Iriyama Y, and Ogumi Z  
JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 151(11), C694-C697 (2004).
- ▶ Preparation of LiFePO<sub>4</sub> Thin Films by Pulsed Laser Deposition and Their Electrochemical Properties  
Iriyama Y, Yokoyama M, Yada C, Jeong S-, K, Yamada I, Abe T, Inaba M, and Ogumi Z  
ELECTROCHEMICAL AND SOLID STATE LETTERS, 7(10), A340-A342 (2004).
- ▶ Preparation of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Thin-Film Electrode by the Oxygen Plasma-Assisted Sol-Gel Method  
Fukutsuka T, Sakamoto K, Matsuo Y, Sugie Y, Abe T, and Ogumi Z  
ELECTROCHEMICAL AND SOLID STATE LETTERS, 7 (12), A481-A483 (2004).

## (3) 炭素系材料

リチウムイオン二次電池の負極材料として用いられる黒鉛化炭素電極でのリチウムイオン移動挙動、表面被膜の形成メカニズム、黒鉛化微小球体などに着目した研究に取り組んでいる。

- ▶ Low-temperature Synthesis of Highly Graphitized Nanofibers for Reversible Lithium-ion Insertion / Extraction  
Doi T, Fukuda A, Iriyama Y, Abe T, Ogumi Z, Nakagawa K., Ando T  
ELECTROCHEMISTRY COMMUNICATIONS, 7, 10-13 (2005).
- ▶ Atomic force microscopy study on the stability of a surface film formed on a graphite negative electrode at elevated temperatures  
Inaba M, Tomiyasu H, Tasaka A, Jeong SK, Ogumi Z  
LANGMUIR 20 (4): 1348-1355 FEB 17 2004

## (4) JST 地域イノベーション創出総合支援事業シーズ発掘試験（京都府）

安部教授は 2007 年より地域イノベーション創出総合支援事業シーズ発掘試験(京都府)

事業において、研究課題「ハイパワーリチウムイオン電池用 CNF-酸化物複合負極材料の開発」を推進した。ハイブリッド自動車用リチウムイオン電池に求められる高出入力特性と高サイクル特性を満たすため、静電噴霧熱分解法を用いて 1 ステップで数十～数百 nm サイズの酸化物微粒子をカーボンナノファイバー上に析出させた複合負極材料を開発した。この複合負極材料によれば、リチウムイオンの拡散パス、電荷移動抵抗および電極の電子抵抗を同時に低減し、電池の高出入力化を図ることができる。また、酸化物として高電位を示すものを用いることにより、電解液の還元分解を抑制し、長寿命化も図った [4]。

#### (5) ポストリチウムイオン電池の取り組み

蓄電池については高容量化が重要な技術課題の一つになっているが、その観点から安部教授らはポストリチウムイオン電池の候補と目される「多価イオン電池」<sup>4</sup>の実用化につながる成果を出した。同電池はリチウムを使わずに正極に酸化物、負極にマグネシウム金属を利用する。1 価のリチウムイオンに比してマグネシウムイオンは 2 価であることから、理論的にはリチウムイオン電池の容量の 2 倍になることが期待される。電解液には有機物の 2-メチルテトラヒドロフランに臭化マグネシウムを加えた溶液を用いた。マグネシウム化合物を添加することによって更に反応効率を上げる目処も立ったとされる [5]。

## (2) CREST 参画メンバー

前項で詳述したように CREST 研究当時助教授（2007 年から准教授）であった**安部武志氏**は、2009 年、教授に昇任し、研究室を主宰している。電極/電解質界面のリチウムイオン移動、全固体薄膜電池、炭素系材料などの研究に加え、ポストリチウムイオン電池の候補として多価イオン電池の研究にも取り組んでいる。小久見研究室の助教（CREST 当時）であった**入山恭寿氏**は 2008 年、静岡大学物質工学科化学システムコースの准教授に就任し、入山研究室を主宰した。同年から CREST「低炭素社会のための s-ブロック金属電池」（内本喜晴研究代表者）の共同研究者として参画し「高安定性 Li/無機固体電解質の実現に向けた界面制御法の開発」に従事している。また、2011 年、JST 先端的低炭素化技術開発（ALCA）

---

<sup>4</sup> ブルームバーグ社が 2011 年 1 月 11 日に報じた記事によれば、ハイブリッド車販売で世界最大手のトヨタ自動車は、電気自動車の動力源としてリチウムイオン電池セルの 2 倍のエネルギー容量を持つマグネシウム電池を開発しているとのことである。以下にその記事から引用する。「…プロジェクトを統括するエンジニア、ジェフリー・マカレウィッツ氏はデトロイトで開催中の北米国際自動車ショーでのインタビューで、ミシガン州にあるテクニカルセンターでマグネシウム電池の開発に取り組んでいると述べた。日本国内の研究所で進めている他の素材開発を補完する狙いがある。マカレウィッツ氏は、『リチウムイオン電池は、理論上は最適条件下で約 2000 キロワット時の容量を持つが、将来のプラグイン方式のハイブリッド車 (PHV) や電気自動車などに必要な極めて競争力のある電池を製造するにはまだ不十分だ』と述べた。同氏は、マグネシウム電池か代替材を使用した電池を搭載した自動車は 2020 年ごろまでに準備が整う可能性があると話した [6].」

において研究課題「その場形成」概念に基づく高出入力型全固体電池の創成」が採択された。2012年には名古屋大学大学院マテリアル理工学専攻材料工学分野の教授に着任した。博士研究員としてCREST研究に参画していた土井貴之氏は、九大先導物質化学研究所の助教を経て、2009年、京都大学産官学連携センター特定准教授に着任した。

この他、他大学からCREST研究に参画していた中では、稲葉稔教授はNEDO「固体高分子形燃料電池実用化戦略的技術開発／要素技術開発／低白金化技術」(2008～2009)、NEDO「固体高分子形燃料電池実用化推進技術開発／基盤技術開発／低白金化技術」(2010～)でそれぞれプロジェクトリーダーを務めている。今西誠之氏は2010年、ALCA（先端的低炭素化技術開発事業）において新規研究開発課題“革新的高エネルギー蓄電システムの開発”が採択された。河村純一氏は2004年から教授。2010年から東北大多元研所長を務めている。

表1 主なCREST研究メンバーの動静

固体/液体界面グループ	CREST 研究時	現在 (2012.3 現在)
安部武志	京都大学大学院工学研究科 助教授	同 教授
入山共寿	京都大学大学院工学研究科 助手	静岡大学大学院 准教授 (2008 ～) 名古屋大学大学院マテリア ル理工学専攻 教授 (2012年～)
鄭淳基	CREST 研究員	韓国・スンチョンヒャン大 専任講師
土井貴之	京都大学大学院 博士課程	京大産官学連携センター 特定准教授 (2009～)
稲葉稔	同志社大学工学部 助教授	同 教授 (2005～)
固体/固体界面グループ	CREST 研究時	現在 (2012.3 現在)
嶺重 温	姫路工業大学工学部 助手	同 准教授
界面構造グループ	CREST 研究時	現在 (2012.3 現在)
河村純一	東北大多元物質研究所 助教授	同 教授/所長
神嶋 修	東北大多元物質研究所 助手	摂南大学理工学部基礎理工学機 構 准教授
液体/液体界面グループ	CREST 研究時	現在 (2012.3 現在)
山本雅博	京都大学大学院 工学研究科 助教授	甲南大学 教授

保原大介	京都大学大学院工学研究科 助手	ソニー先端マテリアル研究所 (2003～)
西直哉	京都大学大学院工学研究科 助手	同 准教授

[敬称略]

### 1.3 CREST 研究の波及

#### (1) 科学技術への波及

##### (a) 21 世紀 COE 「学術統合による新材料科学の研究教育拠点」(2002～2006)

2002 年に京都大学は「学術統合による新材料科学の研究教育拠点」として 21 世紀 COE プログラム<sup>5</sup>に採択されたが、小久見教授は本拠点の拠点リーダーを務めた。本拠点は、化学系 3 専攻（無機化学，有機化学，分析化学，電気化学，生化学，高分子化学）と金属学を核とする材料工学専攻によって構成され，高機能ガラス，生体医療材料，新規遷移金属触媒，高性能分離システム，電池・燃料電池，高性能新規高分子材料，有機-無機ハイブリッド材料，高温超伝導材料，新規磁性体材料などの現代文明社会を支える多種多様な新材料開発のための基礎および応用研究を行った。サブナノないしはピコメートルスケールの原子間距離が問題となる素反応から，巨大分子とその集合体の物性・機能制御へと展開を図る化学の潮流と，可視的スケールから原子・分子スケールの視点へと展開を図る金属・無機結晶学の潮流との協調・競合により，物質の総合的理解に基づく新しい材料科学の創造を目指した。他 COE と異なり，分子素子— 生体コンポーネント，分子配線，金属微粒子の有機マトリックス中への分散，金属フローゲートの開発など，両学域の境界領域に対してバリアを感じることなく研究・教育が共同推進できる材料科学の場を形成した。

終了時に行われた 21 世紀 COE 評価委員会では「matured science に至りつつある化学と金属学を融合させる本 COE の成果が，化学と金属に多くを依拠する材料科学を新しい階層へと発展させるために大きな貢献をすると確信する」という旨の評価を受けた [7]。

##### (b) 国内外における新たな拡がり

CREST 研究の成果はリチウムイオン電池の研究分野において大きな拡がりを見せている。海外では，米国，韓国，イスラエルなどの大学・研究機関から注目されている。例

<sup>5</sup> 21 世紀 COE プログラムは，「大学の構造改革の方針」(2001 年 6 月)に基づき，2002 年度から文部科学省の事業（研究拠点形成費等補助金）として措置された。日本の大学が，世界トップレベルの大学と伍して教育及び研究活動を行っていくためには，第三者評価に基づく競争原理により競争的環境を一層醸成し，国公私を通じた大学間の競い合いがより活発に行われることが重要であるとして，日本の大学に世界最高水準の研究教育拠点を形成し，研究水準の向上と世界をリードする創造的な人材育成を図るため，重点的な支援を行うことを通じて，国際競争力のある個性輝く大学づくりを推進することを目的とする。

えば、MIT Materials Science and Engineering の Gerbrand Ceder 教授<sup>6</sup>も小久見教授の講演を聴講し強い関心を寄せた。

また、京都大学内でも新たな研究コラボレーションが生まれた。例えば、材料工学専攻の松原英一郎研究室では、「蓄電池反応における金属負極の構造相変態とひずみの影響」という観点から特にインターカレーション系電極材料における歪場効果についての基礎研究に取り組んでいる。最近では、ポストリチウム電池設計の指針を得るため、X線回折とX線反射率測定などにより、電池内部で化学反応を担っている活物質の構造変化のその場観察を行い、蓄電池反応機構を明らかにするというX線による蓄電池内部反応の可視化についての研究を行っている[10]。

## (2) 社会経済への波及

低炭素社会の実現へ向けたプラグインハイブリッド車や電気自動車への期待が高まる中で、蓄電池開発はキーテクノロジーとして世界各国で開発に鎬を削っている[11]。更に東日本大震災後の電力供給の不安定さから、かつてないほどに蓄電池への期待が高まっている。電気自動車向けだけでなく電力を必要な時に必要な分だけ供給する“スマートグリッド”では中核技術として注目を集めている[12]。

### (1) NEDO 革新型蓄電池先端科学基礎研究事業「ライジング」プロジェクト<sup>7</sup>

2009年10月からNEDOによる革新型蓄電池先端科学基礎研究事業(通称ライジング)が開始され、プロジェクトリーダーとして小久見教授が事業を統括している。この事業では2009年度から7年で総額210億円を投じられ、トヨタ自動車や日産自動車など12社と京都大学など10研究機関が参加し、テーマ毎に4チームで研究を推進する(表2)。

このプロジェクトでは、蓄電池の電極内、電解液内、それらの界面における全ての事

---

<sup>6</sup> 2009年にNature誌に掲載されたCeder教授らの成果[8]は、その後MITで発表[9]され、国内外で大きな注目を浴びた。これは、リチウムイオン2次電池の正極材料として従来から使われているLiFePO<sub>4</sub>の表面にナノスケールの微小な層を形成する製造方法を採用することで、充電速度を最大36倍まで高められる可能性があるというもの。(従来1セル当たり6分以上かかっていたものが10秒まで短縮できることになる。)計算シミュレーションによる予測を基に材料開発に成功した。

<sup>7</sup> 持続的発展社会の実現を目指す中でクローズアップされているエネルギー資源と環境の重要課題を解決するためのキーデバイスとして蓄電池は大きな関心を集め、世界中で大規模な研究開発が進められている。1990年代から2000年代前半に掛けて、日本は世界に先駆けリチウムイオン電池を製品化し、高い国際競争力を示してきた。しかしながら2000年代後半に掛けて、韓国・中国などのキャッチアップによって、モバイル機器向けの小型蓄電池市場では世界トップの座を失うこととなった。今後10年は、プラグインハイブリッド自動車や電気自動車向けの大型蓄電池市場は大きく拡大することが見込まれており、リチウムイオン電池を巡る市場はますます本格化することが必至と言われる。こうした背景から2009年10月より、更にその地位を確固たるものに国際競争力を一層高めるために、産学官オールジャパン体制でRISING事業を発足させた。

このプロジェクトでは、終了時の2015年までに革新的蓄電池のコンセプトを提案・具体化し、研究室レベルで300Wh/kgの目標を達成することを目指しており、更に2030年にはこのコンセプトを結実させて500Wh/kgの蓄電池が実用化・市販化されることをシナリオに描いている。

象を把握し制御しようという基礎研究からのアプローチを推進しているが、この“蓄電池の事象解析”は、CREST 研究から脈々と取り組んできたことであり、CREST で蓄積された知見や人材が有形無形に基盤となっている。実際に、安部教授（京大）が電池反応解析グループのグループリーダーを務める他、河村教授（東北大多元研）ら CREST 研究時の共同研究者も多く参画している[13].

これまで、電池作動中の界面を調べる術はなかったが、本プロジェクトでは電池作動中に電極界面で何が起きているかをスプリング 8 や J-PARC で調べようとしており[14], 高い透過能と空間分解能を有するシンクロトロン放射光は電池内の現象解明に有力なツールとなっており、非平衡現象や界面現象において従来の静的なバルク測定では得られなかった情報が得られつつある[15].

表 2 次世代電池開発プロジェクトに参加する企業・大学・機関

---

**自動車メーカーなど**

トヨタ自動車, 日産自動車, 本田技術研究所, 三菱自動車, 豊田中央研究所

**電池メーカーなど**

ジーエス・ユアサコーポレーション, 三菱電機, パナソニック, 新神戸電機, 日立マクセル, 三菱重工業, 日立製作所

**大学・研究機関**

京都大学, 産業技術総合研究所, 東北大学, 東京工業大学, 早稲田大学, 九州大学, 立命館大学, Spring-8, 産業技術総合研究所, 高エネルギー加速器研究機構, ファインセラミックセンター, 静岡大学, 茨城大学

---

**参考文献**

- [1] 小久見善八, リチウム電池における界面イオン移動, エネルギー・資源, 26, 4, 15, 2005
- [2] CREST 終了報告書
- [3] <http://elech.kuic.kyoto-u.ac.jp/research.html>
- [4] [http://www.jst.go.jp/chiiki/seeds/kadai/H19gaiyou\\_b60.html](http://www.jst.go.jp/chiiki/seeds/kadai/H19gaiyou_b60.html)
- [5] 日本経済新聞, 2011 年 1 月 10 日
- [6] <http://www.bloomberg.co.jp/news/123-LETIA91A74E901.html>
- [7] [http://www.jsps.go.jp/j-21coe/08\\_jigo/data/jigo\\_kekka/b15.pdf](http://www.jsps.go.jp/j-21coe/08_jigo/data/jigo_kekka/b15.pdf)
- [8] B. Kang and G. Ceder, “Battery materials for ultrafast charging and discharging” Nature Vol.458, p.190-193 (2009)
- [9] <http://web.mit.edu/newsoffice/2009/battery-material-0311.html>

- [10] <http://www.mdsgn.mtl.kyoto-u.ac.jp/page3.html>
- [11] 日経産業新聞, 2009年9月15日
- [12] 日本経済新聞, 2011年12月21日
- [13] <http://www.nedo.go.jp/content/100115477.pdf>
- [14] 日刊工業新聞, 2012年1月4日
- [15] [http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/htm/text/11file/green\\_energy-5/arai.pdf](http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/htm/text/11file/green_energy-5/arai.pdf)

## 2. 乾燥地植林による炭素固定システム構築(研究代表者:山田興一, 1998~2003)

### 2.1 CREST 研究の概要

CREST 研究では、全体システム構成と大気システム研究、土壌システム研究、植生システム研究の 4 研究グループによって乾燥地における大規模植林による持続的炭素固定システム構築と西オーストラリアにおける実証を目指した。その結果、豪州の乾燥地において炭素固定のための乾燥地植林技術を確立した他、各要素技術の体系化と統合化、データの集積が進んだ [1]。また、CREST 研究の一環として西豪州地区の乾燥地帯に植林された樹木は 8 年経過し、順調に育っており高さは約 15m に達している (写真 1, 2)。CREST 研究後は、乾燥地における樹木成長に及ぼす環境条件影響評価などの方法論や技術の汎用化を目指して、半乾燥地への展開可能性の検討などが行われてきている。



写真 1 2003 年の植林後約 8 年経過した樹木 (西豪州)



写真 2 約 1,000 本になる樹木 (西豪州)

## 2.2 CREST 研究後

### (1) 環境省・地球環境研究総合推進費「陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発—大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策—」(2003～2006)

環境省・地球環境研究総合推進費<sup>8</sup>による「陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発—大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策—」が2003年～2006年に実施された。この課題は、“森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価”，“熱帯低湿地生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価”，“農林業生態系を対象とした温室効果ガス吸収排出制御技術の開発と評価”，“研究プロジェクトの統合的推進のためのプラットフォーム形成と情報共有化”の4グループから構成され、課題代表者を山田興一氏が務めた。4グループの内、“森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価”，“研究プロジェクトの統合的推進のためのプラットフォーム形成と情報共有化”の2グループはCREST研究を継続・発展した形になった。“森林生態系を対象とした温室効果ガス吸収固定化技術の開発と評価”では、CRESTのメンバーだった小島紀徳氏、濱野裕之氏らによる“荒漠地でのシステムの植林のための水・塩制御技術の開発に関する研究”，安部征雄氏らによる“荒漠地でのシステムの植林のための環境適応型植林・土壌制御技術の開発に関する研究”，また江頭靖幸氏、高橋伸英氏、山田興一氏による“荒漠地植林技術のプラットフォーム構築に関する研究”が行われた。

このプロジェクトでは、西オーストラリア州の小麦地帯で特に顕著な塩害<sup>9</sup>面積の増大に着目し、すでにオーストラリアの内陸乾燥地で確立したCREST研究の成果を基に、この半乾燥地における新規植林技術の開発を目指した。この研究を通して、CREST研究で明らかにした乾燥地への技術展開の可能性を更に拡張し、半乾燥地の小麦栽培地帯においても炭素固定植林を展開できる可能性を示した[2]。

---

<sup>8</sup>環境省では1990年度から「推進費」を活用して、国立試験研究機関、独立行政法人、大学、民間研究機関など様々な分野の研究機関、研究者の連携・協力の下に、地球環境研究を総合的に進めている。研究資金により、球環境の将来予測・影響・対策等に関する数多くの科学的知見を蓄積しつつあり、例えば、地球温暖化に関する研究成果はIPCCの第3次評価報告書への引用など国際的な面からも貢献している。この「推進費」では、基礎研究、応用研究を含め広く研究を実施しているが、特に、地球環境問題を解決に導くための施策・政策に対する科学的な貢献を明確に志向した研究（政策反映志向型の研究）であることが要件となっている。

<sup>9</sup>耕作地帯の塩害による荒廃地化は世界的な問題となっているが、西オーストラリア州南部の小麦地帯でも塩害が急激に進行し、極めて深刻な問題となっている「オーストラリア西部の小麦地帯に着目した。塩害の主たる原因は原生植生であった森林を皆伐し農地化したことによって植物による水の利用量が減少し、水収支バランスが崩れたことによる。小麦地帯は元々森林地帯であったところを人工的に小麦地帯にした。そのため、森林に比べ蒸散量が少なくなり塩害が進んだ。

## (2) CREST 参画メンバー

表 1 CREST 参加研究者の主な動静

CREST 参加研究者	2011 年時点の所属・役職	CREST 時の所属・役職
福長博	信州大学繊維学部 准教授	信州大学繊維学部 助手
高橋伸英	信州大学繊維学部 准教授	CREST 研究員
濱野裕之	(独) 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 研究員	CREST 研究員
斎藤忠臣	鳥取大学農学部生物資源環境学科 講師	筑波大院農学研究科 学生
谷口雅彦	民間企業	筑波大院農学研究科 学生
塩野克宏	福井県立大学生物資源学部 助教	筑波大院バイオシステム研究科 学生

CREST メンバーの現況については、研究代表者を務めた山田興一氏は東大副総長を務めた後、現在、(独) 科学技術振興機構低炭素社会戦略センターの副センター長を務めている。また、福長博氏が信州大学准教授に昇進した他、CREST 研究員や学生として参画していたメンバーが上表のようにアカデミアや産業界で活躍している。濱野裕之氏 (全体システム構築グループ)、斎藤忠臣氏、谷口雅彦氏、塩野克宏氏 (いずれも植生システム研究グループ)、李大寅氏 (大気システム研究グループ) らは CREST での研究を基に学位 (博士号) を取得した。谷口雅彦氏は大学院学生としてオーストラリアでの乾燥地植林について CREST 研究に参画し博士号を取得、卒業後民間企業で海外開発コンサルタントとして途上国の農業・農村開発支援に携わっている [3]。

日本沙漠学会第 22 回学術大会において、斎藤忠臣氏 (筑波大学大学院生物資源環境学科講師) が、平成 22 年度日本沙漠学会奨励賞<sup>10</sup>を受賞した。(受賞業績名は「乾燥地における表面流出水捕集と土壌侵食防止に関する研究」) また、小島紀徳氏が「乾燥地の工学的利用と大規模植林による炭素固定」によって 2009 年度日本沙漠学会・学会賞 (2010 年)、「地球環境を中心とした学際的俯瞰的化学工学研究」によって化学工学会賞池田亀三郎記念賞 (2012 年) をそれぞれ受賞した。

### 2.3 CREST 研究の波及

#### (1) 科学技術への波及

三井物産環境基金「食料生産が困難な乾燥地での植林による二酸化炭素固定とバイオマス生産・転換・輸送」(2008~2010)

<sup>10</sup> 沙漠ならびに乾燥・半乾燥地に関する萌芽的研究業績を挙げた個人またはグループに授与される賞

共同研究者（土壌システム研究グループ）を務めた成蹊大学・小島紀徳教授らは三井物産環境基金<sup>11</sup>による「食料生産が困難な乾燥地での植林による二酸化炭素固定とバイオマス生産・転換・輸送」（2008～2010）を実施し、CREST 研究で実施した土壌改良実証実験の結果の観測と整理，開発した技術による炭素固定能の評価，適用ポテンシャルの推定を実施した。また，大規模植林後の“バイオマス利用システム構築”を目的とし，バイオマスの最適なエネルギー変換，消費地までの輸送，利用までのストーリー構築と評価を行った[4]。

#### 成蹊大学アジア太平洋研究センター『植林・バイオマス研究プロジェクト』（2008～2010） 「アジア太平洋地域における乾燥地植林による二酸化炭素固定とバイオマス生産・転換」

このプロジェクトはプロジェクトリーダー（小島紀徳・成蹊大教授）を含むメンバー13名中6名がCRESTに参画したメンバー（主に土壌システム研究，植生システム研究各グループ）から構成され，CREST 研究にも関係が深い。このプロジェクトではCREST 研究と同様に西オーストラリア州の2地区を重点調査対象地として，CREST 研究で明らかにされた土壌や土壌炭素に関するパラメータや植物の成長傾向に関する頑健性における問題点などを解明するために追加的調査を実施し，乾燥地におけるシステムの植林技術の開発・汎用化の完成を目指した[5]。

## (2) 社会経済への波及

### (1) NEDO「乾燥地を利用した持続的バイオマス生産システムの要素技術の研究開発」 (2006～2008)

CREST メンバーだった江頭氏，高橋氏らによって，CREST 研究の成果を基にしたバイオエタノール生産についての検討がNEDOプロジェクトで行われた。CREST 研究で西オーストラリア（レオノラ地区）の乾燥地（年間降水量217mm）でユーカリ *E.camaldulensis* が活着することが確認されたことを踏まえ，省エネルギー・低コスト化のための要素技術として萌芽更新<sup>12</sup>の利用，爆破の改善を試みた。コスト面の問題は残ったものの萌芽更新や成長において良好な結果が得られた。

### (2) オーストラリアとの研究交流

CREST 研究で形成されたオーストラリアとの研究交流は現在もなお継続しており，両者にとって win-win の良好な関係を築いている。写真3に示すように，CREST の現地研究サ

---

<sup>11</sup>持続可能な社会の実現を目指して，地球環境問題の解決に向けたNPOや大学などのさまざまな活動・研究を支援・促進する基金（2005年～）。三井物産による。

<sup>12</sup>樹木の伐採後，残された根株の休眠芽の生育を期待して森林の再生を図る方法。

イトはオーストラリア当局の協力もあって現存しており、看板には下記のように JST の研究資金により設置された旨や現在も研究に用いられている旨が明記されている。

・・・These research sites were commissioned in 1999 and fully funded by JST. Researchers from Japan have used this site to develop and demonstrate technologies for sequestering carbon from the atmosphere through arid afforestation or arid carbon sinks to mitigate future global warming, and to determine the research effectiveness.



写真3 現存する植林地帯（西豪州）

また、山田氏はエディスコーワン大学（Edith Cowan University）の客員教授を務め、同大学で講演を行うなど CREST 研究終了後も当地と不断の交流を続けている。2 節で言及した環境省地球環境研究総合推進費「陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発」（2003～2006）では、Sturt Meadows において Minesite rehabilitation services Pty Ltd に測定機器の設置・管理、植林地の管理、現地情報収集を委託し研究遂行上の強力なカウンターパートとなっている[2]。この他、オーストラリアのベンチャーなどから炭素固定技術のビジネス化や掘削後の鉱山の土壌リハビリテーションなどを狙って CREST 研究で開発した植林技術に引き合いがあった。西豪州農林大臣ら政府関係者も多く視察するなど現地での関心も高い。

### (3) 叢書の発刊「沙漠を森に—温暖化への処方箋—」（コロナ社）

成蹊大学アジア太平洋センターで実施された「アジア太平洋地域における乾燥地植林による二酸化炭素固定とバイオマス生産・転換」プロジェクトの成果を基に、2011年3月、叢書「沙漠を森に—温暖化への処方箋—」（コロナ社）を上梓した（小島紀徳（著、編集）、江頭靖幸（著、編集）、斉藤昌宏（著）、菅沼秀樹（著）、黒澤勝彦（著）、相川真一（著））。本書では、成蹊大学アジア太平洋センターのプロジェクトはもとより CREST、環境省地球環境推進費などの関連するプロジェクトの成果の集大成として、研究成果やその効果の展望について述べられており[6]、CREST 研究の成果が社会に向かって発信されていることが窺える。

## 参考文献

- [1] 山田興一, エネルギー・資源, 26, 4, 45, 2005
- [2] 環境省地球局総務課研究調査室, 環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書陸域生態系の活用・保全による温室効果ガスシンク・ソース制御技術の開発—大気中温室効果ガス濃度の安定化に向けた中長期的方策—,
- [3] [http://www.bres.tsukuba.ac.jp/candidate/candidate\\_minkan.html](http://www.bres.tsukuba.ac.jp/candidate/candidate_minkan.html)
- [4] [http://www.mitsui.com/jp/ja/csr/contribution/fund/results/pdf/kikinbinran2010\\_9.pdf](http://www.mitsui.com/jp/ja/csr/contribution/fund/results/pdf/kikinbinran2010_9.pdf)
- [5] [http://www.seikei.ac.jp/university/caps/japanese/03projects/01\\_0004.html](http://www.seikei.ac.jp/university/caps/japanese/03projects/01_0004.html)
- [6] [http://www.seikei.ac.jp/university/caps/japanese/04publication/newsletter\\_pdf/no110.pdf](http://www.seikei.ac.jp/university/caps/japanese/04publication/newsletter_pdf/no110.pdf)

### 3. 植物系分子素材の高度循環活用システムの構築（研究代表者：船岡正光，1999～2004）

#### 3.1 CREST 研究の概要

CREST 研究の目的は、地球生態系物質循環システムの起点に位置する森林資源を Energy, Function, Time の因子で動的に捉え、人間社会におけるエネルギーとマテリアルの流れに具現化するという全く新しい炭素資源の逐次循環活用システム（循環型分子及び循環型材料の設計、その誘導技術の開発、循環型材料を円滑にフローさせる社会システム）を構築することであった[1]。森林資源を複合体から機能性分子へと円滑にフローさせるためには、次の3つの要素技術が必要となる：

- ① 樹木細胞壁高分子複合系の解放システム
- ② 芳香族系長期循環型素材（リグニン）の精密分子構造制御システム
- ③ リグニン系機能材料の開発とその多段階利用システム

CREST 研究ではこれらの要素技術を確立するため主として以下の項目について集中的に検討を行った[1]。①に関しては、糖質・リグニンの選択的な構造制御プロセスを常温・常圧で進行させる新しいプロセスとして既に考案した“相分離系変換システム”<sup>13</sup> [2] について、個々の細胞壁構成素材に最適な環境を設定し、常温・常圧下で分子機能変換と分離の達成を目指した。②、③については、生態系における天然リグニンの持続性機能発現メカニズムを分子レベルで解析すると共に、その構造と機能を活用する新たなリグニン分子機

---

<sup>13</sup> このシステムでは、疎水性リグニンと親水性炭水化物に相混合しない個別の反応系（機能環境媒体）を設定し、リグニンは Phenolysis によって、もう一方の炭水化物は Hydrolysis による常温常圧下で選択的に変換・分離される。リグノセルロース系複合体（粉体）を疎水性媒体（フェノール誘導体）で溶媒和した後、酸水溶液中に投入し、系を激しく攪拌すると、疎水性フェノールは水中で微粒子状に分散し、内部のリグノセルロースは界面でのみ短時間酸と接触する。炭水化物は膨潤し、部分加水分解を受ける。一方、リグニンのベンジルアリアルエーテルが開裂、生成したカチオンにはフェノール誘導体が導入され、高度な細胞壁複合系に緩みが生じる(1<sup>st</sup> Control)。加水分解を受けた親水性炭水化物はフェノール相から水相へと抜け出す(2<sup>nd</sup> Control)、変換によって疎水性の高まったリグニンは反対に粒子界面から中心部へと移行し、結果として酸との接触による複雑な2次変性は可及的に抑制される(3<sup>rd</sup> Control)。系の攪拌を停止すると両相の比重差により反応系は機能変換リグニンを含む有機相（上層）と炭水化物を溶解した水相（下層）に分離する。

能制御システムを考案した。リグニンの有効利用は「積年の課題」となっており、「カーボン代替材料としてタイヤ（ゴム）補強材に転用」（大王製紙）、「リグニンを原料とした接着剤を開発」（森林総合研究所）などいくつかの取り組みが公表されてきたが、いずれも消費規模は小さく、またここで利用されるリグニンは廃棄物となったリグニンで、高分子構造が破壊されているため多様な利用ができない。従って、これらの CREST 研究成果は、森林系分子素材、特にこれまで廃棄を余儀なくされていた芳香族系生体高分子リグニンに機能性分子素材としての新たな価値を与えるものである。

## 3.2 CREST 研究後

### (1) 研究成果の進展

#### (a) SORST 「植物系分子素材の逐次精密機能制御システム」（2004～2009）

##### (i) 資源変換システムの開発

SORST 研究では、CREST 研究で構築したバッチシステムを基に連続変換が可能な流通系に発展させた。工程は脱脂・収着ユニット、相分離変換ユニット、精製回収ユニットから構成されるが、前二者の工程について固体のハンドリングやスラリー輸送などの合理化に注力しリグノフェノール溶液と糖質の硫酸溶に2層分離する連続相分離運転が可能となった。本方法のスケールアップが実現すれば、Field（森林・牧場）、Factory（木材工など）、City（一般過程、リサイクル施設など）の各拠点にオンサイト運転が出来るようになる。一方、加水分解された糖質は疑似移動型クロマトグラフィーにより工程硫酸と分離が可能であることも明らかになった。これら各工程については特許出願済みである。

##### (ii) リグノフェノールの高度利用と循環型材料への設計

植物系バイオマスから脂肪族材料を誘導する方法は数多く知られているが、リグニンについては芳香族系としての活用は進んでいない。本 SORST 研究ではリグノフェノールを安定的に生産できるようになったことから、その特質を活用できるような材料の開発を検討した。特に、熱可塑性や溶媒に可溶であるという特徴から、循環型リグノフェノールプラスチック、リサイクル複合材、易脱着型接着剤など、またフェノール成分の特徴を活かした電磁波シールド材、分子分離膜、フォトレジスト、金属元素吸着体、バッテリー機能制御剤などが開発中である。更に芳香族化学原料としてのモノマー成分への転換も検討している。

#### (b) 「相分離変換法を用いた木質バイオマスの全量活用型低コストエタノール製造技術実証研究（2011-2013）」

EEFA<sup>14</sup>と船岡教授が環境省に提案していたバイオマス・循環資源低炭素化技術開発分野領域 I グリーンイノベーション推進実証研究領域 技術開発課題「相分離変換法を用いた木質バイオマスの全量活用型低コストエタノール製造技術実証研究 (2011-2013)」が採択された。(平成 23 年度内示額 225,000 千円) 本研究は, 相分離系変換システムのプラントを徳島県那賀町に建設し, 世界初となるリグニン (リグノフェノール)・糖質同時高機能利用システムの社会実証試験を産官学民が一体となって 3 年間にわたり行うものである。CREST 研究, SORST 研究により確立した基盤技術を基に, 森林から始まる新しい持続的工業ネットワークを社会で具現化すべく, 社会展開を進めている。

## (2) CREST 参画メンバー

CREST 研究員として参画していた青柳 充氏は 2009 年に三重大学大学院生物資源学研究科の特任准教授に就任した。第 17 回日本 MRS 学術シンポジウム奨励賞(2007 年), 合成樹脂工業協会学術奨励賞(2009 年), 高分子学会第 19 回ポリマー材料フォーラム優秀発表賞(2010 年)など様々な学会で受賞をしている。更に, 三重県名張市「バイオマスマテリアル事業化研究会」座長や徳島県那賀町広域化バイオマスタウン事業計画推進作業部会マテリアル事業部会 部会長なども務め, CREST 研究成果の普及活動においても重要な役割を担っている。三亀啓吾氏は 2009 年に三重大学大学院生物資源学研究科 特任准教授に就任し, 2011 年より京都大学生存圏研究所 特定研究員を務めている。同氏は 2011 年度合成樹脂工業協会学術奨励賞を受賞した。前田美代子氏はスタッフとして CREST, SORST の研究活動を支え続け, その存在は「単なる事務に留まっていない」と船岡教授から絶大な信頼を寄せられた。

## 3.3 CREST 研究の波及

### (1) 科学技術への波及

#### (a) 学術的にも新しい材料

森林資源を木材から機能性分子まで逐次循環利用するためには, 林業から合成化学まで多様なネットワークを形成しなければならず, 木材学会のような天然物に特化した学会のみならず日本化学会, 高分子学会, 化学工学会など幅広い学会活動を行ってきた。研究開始当初 (1999 年頃) は学会発表の際も合致するセッションが極めて少なかったが, 現在ではバイオマテリアルの分子設計や変換・機能制御といった学会の中心テーマの一つに発展

---

<sup>14</sup>特定非営利活動法人環境・エネルギー・農林業ネットワーク (Environment, Energy, Forestry and Agriculture Network :EEFA)2006 年 12 月 11 日に設立。部会活動の一つにリグノフェノール部会がある。

してきた。CREST 研究の初期から、「人間の目的物ありきで森林資源を見ると、それらが本質的に有する機能が見えない」と学会で主張してきたが、生態系の機能をまず解明し、そこからこれらの機能を活かす製品を作り出そうという取り組みが浸透してきた[3].

特に合成樹脂工業協会からは、船岡教授が合成樹脂工業協会学術賞(2006)、電気化学会論文賞(2011)を受賞したのに加え、青柳氏、永松ゆきこ氏がそれぞれ同協会学術奨励賞を受賞した(青柳氏 2009 年受賞, 永松氏 2003 年受賞)。また、高分子学会ポリマー材料フォーラムでは、青柳氏が第 19 回優秀発表賞(2010 年)を初め 3 度受賞しており、リグノフェノールを中心とする船岡グループの研究が新しいバイオ材料の一つの姿として位置づけられた。また、CREST 研究に対し、2004 年”日経地球環境技術賞”(日本経済新聞社)が授与された。

#### (b) 総説図書の上梓

2005 年、シーエムシー出版から「木質系有機資源の新展開」を出版した。ここでは CREST メンバー全員が各チャプターを執筆した。2009 年、船岡教授を監修者としてシーエムシー出版より「木質系有機資源の新展開 II Advanced Technologies for Woody Organic Resources II」(写真 1)が上梓された。バイオマス社会の次なるステップを目指し、リグノセルロース利活用を総説した。ここでは、リグニン・セルロース・ヘミセルロースの効果的な分離技術や制御方法とその応用や再生可能な芳香族系化合物であるリグニンの完全活用など船岡教授が開発した相分離系変換によるリグノフェノールを中心に、車体外板、接着剤、金属吸着剤、分離膜など広範囲な利用が見込まれる機能性材料としての応用を紹介した。34 名の著者陣には、船岡教授、青柳氏、三亀氏ら 5 名の CREST メンバーが含まれている。(SORST メンバーまで含めると 7 名に上る.)



写真 2 2009 年に上梓された  
「木質系有機資源の新展開 II Advanced Technologies  
for Woody Organic Resources II」(シーエムシー出版)

## (2) 社会経済への波及

### (a) 事業化の取り組み

船岡教授らが提唱する相分離系変換システムを具現化するために、プラントを設計・建設しベンチスケールの変換試験を実施してきた。前節で述べたように、CREST 研究、SORST 研究により確立した基盤技術を基に、森林から始まる新しい持続的工業ネットワークを社会で具現化すべく、現在、環境省 PJ として 2011 年度より 3 年間の計画で社会展開を進めている。また、研究成果や技術を広く効果的に社会に展開するためリグノフェノール研究会を主宰している。同会には約 50 社が参加しており、定期的な技術交流や意見交換を行っている。

### (i) プラントにおける実証試験

本格的な植物資源変換システムの試験プラントが、CREST 研究の一環として 2001 年に三重大学構内に建てられた。その後、林業、木材工業の企業から合成化学工業関連企業まで、約 20 社が北九州（若松）に集まり、農水省林野庁のプロジェクトの一環として 2003 年 12 月から第 2 号プラントでの実験をスタートさせた。これにより比較的大規模な試験運転が可能となった。さらに 2007 年には SORST 研究の一環として和歌山県に建てられた第 3 号プラントが建設された。これは連続・軽量・コンパクトを特長としフィールド対応型としての工程検討に用いた。2008 年春には、同プラントが稼働し始め、実用化に向けた検討が続けられた。3 号機プラントを踏まえて、徳島県那賀町に 4 号機プラントが 2012 年完成し、試運転を開始した[4]。このプラントによってスケールアップが実現し、kg 単位のサンプル提供が可能になることが期待される。

表 1 相分離系変換システムの試験プラント

プラント	方式	完成年	設置場所
1 号機	バッチ式	2001 年	三重県三重大構内
2 号機	バッチ式	2003 年	福岡県北九州市（若松）
3 号機	連続式	2007 年	和歌山県和歌山市
4 号機	連続式	2012 年	徳島県那賀町



写真2 4号機プラント（徳島県那賀町）

船岡教授ご提供

## (ii) リグノフェノール研究会の主宰

実際問題として、木材からリグニンを抽出してリグノフェノールを生産するだけでは、木材資源の限られた利用で終わってしまう。そこで船岡教授は、この技術をあくまでも木材資源のリサイクル・システムの中に位置づけることを提案し、それを実現するための技術移転の手法を TLO とともに模索した。リサイクル・システムを作るためには、リグノフェノールを生産する原料メーカーだけでなく、システムの各段階を担う様々な企業を巻き込む必要がある。TLO 側の発案により、複数企業による「リグノフェノール研究会」が発足した。現在、荏原製作所や大手日用品メーカーなどが参加している。この研究会が母体となり、今後の実用化を目指した開発研究が進んでいる[5]。リグノフェノール研究会は 2011 年で終了し、その活動は「技術研究組合 Lignophenol & Systems」に発展的に引き継がれている。

### (ii-1) 技術研究組合 Lignophenol & Syatems の設立

2011 年 1 月 5 日、船岡研究室で開発した「リグノフェノール」の事業化のために、かねてから経済産業省に申請していた技術研究組合 Lignophenol & Syatems の設立が同省から認可された。

### (ii-2) 地域との共同研究

現在、社会ではバイオエタノールなどのように単発的な資源利用が繰り返されているが、徳島県那賀町、三重県津市を初めいくつかの市町村で船岡教授らの技術の導入を検討し始めている。2009 年、バイオマスタウン構想を進める徳島県那賀町は木材などからエネルギー源を取り出すバイオマス技術の共同研究に関する協定書を三重大と締結した。協定書の項目には「三重大学船岡正光教授の研究室分室設置」も含まれており、那賀町では豊富な森林資源を生かして、相分離プラントの商業化へ向けた実証試験や技術研究を行われる運びである [6]。

## (b) 海外への波及

船岡研究室を中心にして進められた CREST 研究の成果は海外でも事業化が検討されたり、共同研究が行われたりしている。ここではマレーシアにおける事業化検討やフィンランドにおけるプロジェクト中核技術の事例を紹介する。

### (i) マレーシア

パームオイル産業はマレーシアの GDP の約 10%分に相当し、主幹産業となっている。マレーシア、インドネシアなどの熱帯地域では、オイルパーム (*Elaeis guineensis*) 油脂系産業では、FEB(Fresh Fruit Bunch) の実からパーム油を生産する際に、炭水化物(セルロース及び逸見セルロース)及びリグニンから成る EFB(Empty Fruit Bunch; 油ヤシ空房)が大量に排出される。EFB の構成分子は複雑に絡み合いそれぞれの構造を精密に制御することが難しいため、EFB の有効活用に関する研究としてはパルプ化、糖化など炭水化物の利用に着目したものが主流であった。実際に EFB は燃料として廃棄されるか或いは農園の肥料として利用されてきた。科野らは相分離系変換システムを用いて EFB 分子複合系を芳香族系素材(リグノフェノール)及び脂肪族系素材(糖質)へ精密変換し、誘導された EFB リグノフェノールの構造特性の解明を試みている。

パームオイル産業から大量に廃棄される未利用バイオマスであるアブラヤシ空房から機能性材料として注目されるリグノフェノールを製造するとともに、発酵原料たる糖を副生するという「油ヤシ空房からのリグノフェノール製造」に関する研究は、マレーシア国ジョホール州政府が資金提供を伴う共同研究を提案するなど高い関心が示されており、事業化に向けた検討が行われている。また、マレーシアの国家プロジェクトの一つである「パームオイル製造廃液からの微生物プラスチック PHA 製造」についても、フェルダホールディング (FELDA Holdings)<sup>15</sup>と共に事業化を検討されている [7]。

### (ii) フィンランド

国土の約 60%が森林であるフィンランドは紙パルプや木材は重要な基幹産業である。バイオマス発電もフィンランドは日本より先行して始めており発祥の地に当たる。フィンランドではポスト石油資源として森林資源に早くから着目しており、様々な取り組み

---

<sup>15</sup> マレーシア最大のパーム油生産会社。世界パーム生産の約 8%を生産し、年間 300 万トンの空果房を排出している。2011 年 3 月に、「空果房のみを利用したバイオマス発電プラントを建設する」と発表。同社は 2004 年にマレーシアで初めて空果房を原料とした発電 (7.5MW) を行っており、今回の発電プラントは 2 基目となる。更に 2013 年までに、自社が排出する空果房をすべて再利用する計画がある。日本とマレーシアの共同研究は、2004 年から 3 年間行われた。日本の九州工業大学(白井教授)、マレーシア・プトラ大学(University Putra Malaysia)およびフェルダホールディングの 3 社による共同研究が 2004 年から 3 年間行われ、2005 年にパーム油廃水を原料とするメタン発酵実証試験設備が建設された。発生するメタンから 500kW の発電が可能という [[http://www.asiabiomass.jp/topics/1106\\_04.html](http://www.asiabiomass.jp/topics/1106_04.html)]。船岡教授もこの共同研究に参画した。

を行ってきた。そのためリグノフェノールの認知度がもともと高かった。森林資源を有効に活用しようという EU のプロジェクト、インディスペュタブル・キー (INDISPUTABLE KEY)<sup>16</sup> にタンペレ大 (Tampere University) は船岡教授と共に参画している [8]。同大プラスチック・エラストマー研究所の Kolppo シニアリサーチサイエンティストによれば、船岡研究室が開発した分子レベルでリグニンを多段階に利用するという技術は Funaoka Process と呼ばれており、このプロジェクトを通して EU でも非常に注目されている [9]。実際に kg オーダーでの試料提供を船岡教授に強く要望している。

### (c) 機能材料の創出

これまでに船岡研究室を中心とした船岡教授の研究グループはリグニンの機能を制御することによって次のように様々な機能材料を創出してきた [10]：

- 循環型リグノセルロース系プラスチック
- リグノフェノールの高タンパク質吸着活性を利用した脱着型固定化酵素システムへの応用
- 鉛蓄電池負極における金属複合化による鉛蓄電池の持続性向上
- リグノフェノールの電子伝達系を活用した色素増感型太陽電池への応用
- ジアゾナフトキン/リグノフェノール複合系の感光性能を利用したフォトレジストへの応用
- リグノフェノールの高密度芳香核構造を利用した電磁波シールド材料や分子分離膜への応用

ここでは、特にバッテリー、車体への応用事例を紹介する。

### (i) バッテリーへの応用

リチウムイオン電池に比べリサイクル性、大電流特性という点で優れる鉛蓄電池は、自動車のバッテリーとして広く利用されているのを初め、バックアップ電源やフォークリフト・ゴルフカートといった電動車用主電源などにも今なお必要とされている。

この負極にリグニンを含有させると持続性が向上することが経験的に知られていた。リグニンには負極活物質の粒子を微細化し多孔化して反応表面積を大きくし、放電性能を高める効果があるとされてきたが、そのメカニズムの解明を目指した基礎研究は概ね 20 年サイクルで到来してきたが、ブレイクスルーまで到達せぬまま衰退を繰り返してきており、リグニンの分子構造と鉛蓄電池の負極性能の関係は現在も不明な点が多く残されてきた [11-12]。

高率放電で使用される鉛蓄電池の寿命は負極の反応物質 (活物質) の劣化による容量

---

<sup>16</sup> Indisputable key プロジェクトは生物資源の効率的利用のために特に森林資源の逐次利用における工業的なブレイクスルーを導くことを目指している。

低下に大きく影響される。古くから鉛蓄電池の負極の性能改善のために、負極には植物中から得られるリグニンが半ば経験的に添加されてきた。リグニンには活物質の粒子が凝集・粗大化するのを抑制し微細化する効果が認められてきた。しかしながら、現在用いられているリグニン（工業リグニン）は製紙工業におけるパルピング工程の副生成物であり、リグニンはその分離過程で高エネルギー処理を受けるために、その構造は多様で複雑になっている。そのため、鉛蓄電池負極におけるリグニンの放電容量発現効果や作用機構を明らかにすることが出来なかった。新神戸電機の木村氏らは舩岡研究室が開発した“相分離反応プロセス”はリグノフェノールの構造と機能を制御できることから同技術を用いて、天然リグニンから分子構造を把握し各種の特性を示すリグニン（リグノフェノール）を誘導し、これを負極に用いることによってリグニンの分子構造と負極性能の関係を調べ、リグニン分子のメトキシル基が負極の高率放電特性を向上させることを明らかにした [13]。

## (ii) 車体への応用

リグノフェノールの接着性を活かして植物系ボディーの乗用車への用途も検討されている。2005年に開催された愛知博覧会でトヨタ自動車が展示した一人乗りコミューターの i-unit の車体にマオの高強度繊維とケナフから抽出したリグニン樹脂を組み合わせた再利用可能なプラスチックが使用された [14]。また、2006年2月、トヨタ自動車グループの車体メーカートヨタ車体（愛知県刈谷市）が水処理装置の総合メーカーである荏原（東京都大田区）と組み、植物系の繊維強化樹脂をボディーの外板素材に採用した“究極の環境に優しいクルマ”（写真2）の開発に乗り出すと発表した。その中で新材料「リグノフェノール」の製造特許に関して、荏原とライセンス契約を結んだことも明らかにした [15]。植物系樹脂ボディーが乗用車に採用されれば、その軽さによって燃費は格段に向上したり廃車後のリサイクルが容易になったりするなどのメリットが期待される。2007年の第40回東京モーターショーや2008年のメッセナゴヤ2008（9月11日～14日／ポートメッセなごや）では、トヨタ車体社はこのバイオプラスチックを車体に利用した一人乗り電気自動車「コムス・バイオプラスチック」を参考出品した [16]（写真3）。



写真2 第40回東京モーターショー(2007年)に展示された COMS BP（コムス バイオプラスチック）：ワールドプレミアコムストヨタ車体株式会社ニュースリリース（2007.10.9）より

<http://www.toyota-body.co.jp/ps/qn/guest/news/showbody.cgi?CCODE=1&NCODE=1>

## 参考文献

- [1] SORST 終了報告書
- [2] M.Funaoka, Tappi J., vol.72, pp.145-149 (1989)
- [3] CREST 終了報告書
- [4] 2012年3月3日附徳島新聞
- [5] 隅蔵康一, 研究技術・計画学会予稿集, 2000
- [6] 徳島新聞 2009/8/8
- [7] <http://www.lsse.kyutech.ac.jp/~asiacore/japanese/gaiyou.htm>
- [8] <http://www.indisputablekey.com/about.php>
- [9] Kari Kolppo, SORST 「植物系分子素材の逐次精密機能制御システム」総括シンポジウム講演予稿集, 39, 2009
- [10] SORST ジョイントシンポジウム(3)環境調和側新材料とその活用 講演要旨集, 2005
- [11] 木村隆之, 寺田正幸, 船岡正光. “リグニン構造が与える鉛蓄電池の負極性能への影響”, 新神戸テクニカルレポート, 17, 3, 2007
- [12] 船岡正光, 材料, 56, 12, 1189-1193, 2007
- [13] 木村隆之, 船岡正光, SORST 船岡研究プロジェクト総括シンポジウム講演予稿集, 69, 2009]
- [14] 森田真, 本島顕, 富士通テン技報 Vol.24 No.26, 3-6
- [15] FujiSankei Business I 2006年2月22日
- [16] トヨタ車体, プレスリリース, Sep. 8, 2008

## 4. 新規化学結合を用いるシリコン薄膜太陽電池（研究代表者：小林光，2000～2005）

### 4.1 CREST 研究の概要

小林教授が JST のさきがけ研究（1995～1998；「界面を光電子分光法で観る」）において考案したバイアス電圧印加時の XPS 観測法 [1] を用いて界面準位を直接的に観測することに初めて成功した。界面準位の研究を進展させた結果、半導体の欠陥準位が金属的な性質をもっていることを見出した。そこで、鉄や銅などの金属原子に強く結合するシアニ化物イオン（CN<sup>-</sup>）が欠陥準位と選択的に反応してこれらを消滅させる可能性を着想し、CREST 研究では新規欠陥消滅法によるシリコン太陽電池の高効率化を目指した。

その結果、CN<sup>-</sup>イオンを用いる種々の半導体欠陥消滅処理を開発し、研究室レベルに留まらず太陽電池メーカーが製造した太陽電池の高効率化にも成功した。また、この新規な欠陥消滅法は従来の水素処理法と比較して、熱的にも放射光照射に対しても安定であること、更にシリコン以外の半導体材料にも適用出来ることも併せて示した。

### 4.2 CREST 研究後の進展

#### (1) CREST 研究後の主な研究成果

CREST 研究後に推進した主な大型研究事業から、JST 大学初ベンチャー推進事業（2004-2006）、CREST 研究（2006-2011）について概要をそれぞれ述べる。また、CREST 研究で検討事項となっていた「無毒物質からの HCN 水溶液製造」についても進捗状況を述べる。

##### (a) JST 大学発ベンチャー推進事業（2004-2006）

2004 年度、JST の大学発ベンチャー推進事業において課題「欠陥消滅機能を持つ半導体洗浄液の実用化研究」（開発代表者：小林光，起業家：岩佐仁雄）が採択された。HCN 水溶液の pH を制御することにより CN<sup>-</sup>イオンの濃度を高めて、銅やニッケル、クロム、鉄などの汚染に対する洗浄能力を向上させるほか、特殊な溶液による pH 調整によってシ

リコン表面のエッチングを抑え表面荒れを少なくするなど、種々の改良研究により、優れた洗浄能力に加え、半導体欠陥消滅機能を有する新洗浄液を開発した。また、これらの成果を基に株式会社 KIT（代表取締役：（設立時）岩佐仁雄、佐賀達男（現在）、本社：大阪市北区、資本金（設立時）500 万円、1050 万円（現在））を 2007 年 4 月 3 日に設立した[2]。（3.2 節において詳述。）

#### (b) CREST「極限ゲート構造によるシステムディスプレイの超消費電力化」(2006-2011)

2006 年、研究領域「情報システムの超消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」（研究総括：2005～2012）において、研究課題「極限ゲート構造によるシステムディスプレイの超消費電力化」を実施した。ここでは、システムディスプレイの超低消費電力化を目的とした材料、プロセス、デバイス、回路、システムの統合的な研究開発を行った。特に、材料・プロセス・デバイスからのアプローチとして、小林研究室で開発したシリコンの低温酸化法である“硝酸酸化法”<sup>17</sup>を活用した。本研究では、この硝酸酸化法によって極低リーク特性が得られることをシステムディスプレイ駆動の薄膜トランジスタ（TFT）のゲート酸化膜に応用することによって、ゲート酸化膜の薄膜化・微細化・超低消費電力化を図った。

一方、回路・システム面からもシステムディスプレイの超低消費電力化を図り、動画と静止画部分を区別して駆動するマルチドライバ方式を用い、更にリフレッシュレートを低くすることによって超低消費電力化率 1/9 を実現した。また、システム面からの超低消費電力化のアプローチとして画素メモリを用いる方式を開発し、外部周辺回路の停止とリフレッシュレートの低減化（従来の 60Hz から 1Hz に低減）を実現し、低消費電力化率 1/50 を達成した。従って、トータルの低消費電力化率として 1/2,000～1/10,000 を達成した<sup>2</sup>[3]。その結果、10nm のゲート酸化膜を有する TFT で 1V 駆動が可能になり、消費電力を 1/225 に低減し、低消費電力化を実現した<sup>18</sup>

#### (c) 無毒物質から HCN 水溶液を製造

CREST 研究では無毒物質から HCN 水溶液を製造する方法は CREST 研究後の検討項目となっていた[4]。その後、無毒物質（メタン、メタノール等の炭素含有物質とアンモニアや窒素等の窒素含有物質）から触媒反応を用いて欠陥消滅型洗浄液（～3000ppm の高濃度 HCN 水溶液）を 500mL/h の速度で合成する方法を開発した。更には、使用後の欠陥消滅型洗浄液を安全に廃棄する方法として、紫外光照射によりオゾン水を生成しこれ

<sup>17</sup>硝酸酸化法ではシリコンを濃度 68%の共沸硝酸に浸漬するだけ高性能な極薄 SiO<sub>2</sub>/Si 構造を 120℃以下の低温で創製することができる。従来、900℃程度の高温を用いる熱酸化法によるもののがもっとも特性に優れるとされてきたが、120℃以下の低温で酸化膜を形成したにもかかわらず良好な電気特性、特に低いリーク電流密度が実現できた。

<sup>18</sup>当初目指した低消費電力化率は 1/250 であったので、それよりも格段に良好な低消費電力化率を達成できたことになる。

によって洗浄液を窒素と炭酸ガスに完全無毒化・分解する方法も開発した。

## (2) CREST 研究メンバーの現況

大阪大学産研学振研究員として CREST 研究に参画していた長山（アスハ）氏は現在、内モンゴル師範大学学院長を務める。博士後期課程学生として CREST 研究に参画していた櫻井岳暁氏は筑波大学電子・物理工学専攻の講師となった。

また、CREST 研究メンバーから 2 名が JST の研究代表者となった。2009 年に岡本博明教授（阪大基礎工）が CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域（研究総括：山口真史・豊田工業大学教授）に新規採択（研究課題：「アモルファスシリコンの光劣化抑止プロセスの開発」）された。2010 年には吉田博教授（阪大産研）が先端的低炭素化技術開発事業（ALCA）において新規採択（研究開発課題「超高効率エネルギー変換スピノードル・ナノテクノロジー」）された。

この他、笠井俊夫教授（阪大理学研究科）が停年退官後、台湾国立大学の客員教授を務めている。

## 4.3 CREST 研究成果の波及

### (1) 科学技術への波及

#### 半導体新規化学プロセス研究会

小林教授は半導体新規化学プロセス研究会<sup>19</sup>を主宰し、小林研究室で開発した新規半導体欠陥消滅技術、半導体洗浄技術、絶縁膜低温形成技術の実用化を目指して、これらの技術の詳細な説明を行うと共に、半導体デバイスメーカー、装置メーカー、薬品メーカーと共同で討論を行っている。(i)太陽電池、(ii)LSI、(iii)TFT の製造プロセスにこれらの技術を利用するにあたってのメリットを確認して、デメリットを克服するための対策を考案し、デバイスメーカー側からの要望を十分に考慮して、半導体デバイス製造装置と薬液の仕様や性能を決定するための議論を行う場となっている。

### (2) 社会経済への波及

前章で CREST 研究の進展について述べたが、小林教授の研究は太陽光発電の効率や製造コスト、液晶の消費電力など実社会に直接役に立つ面も多い。ここでは、実社会にどのような貢献をしているか、あるいは意義があるかという観点で改めて社会経済の波及として再整理してみた。

---

<sup>19</sup>一般財団法人 大阪大学産業科学研究協会による新産業創造研究会新産業創造研究会の一環として開催。

## (a) CREST 研究成果の経済社会への貢献・意義

### (i) 太陽電池の効率向上

太陽電池のエネルギー効率の向上や東日本大震災によるエネルギー供給事情の逼迫から、太陽電池は再び強い脚光を浴びてきている。そのため製造工程における洗浄というように実用の際に技術的課題が重視されてきている。しかしながら、面積当たりの単価が LSI や TFT と比較して格段に低い太陽電池の場合、半導体製品と同様の洗浄技術を用いるとコスト面で割があわないという現実的な問題があった。小林教授らが開発した“欠陥消滅型半導体洗浄法”<sup>20</sup>では従来の洗浄液の 1/100 以下の量で反復使用できることから洗浄コストが大幅に低減するため、太陽電池製造工程における洗浄プロセス用途として注目される。実際に、多結晶シリコン太陽電池に対して、この“欠陥消滅型半導体洗浄法”を用いて金属汚染の除去と欠陥消滅を施したところ、エネルギー変換効率が 10% から 13% 以上になった（反射防止膜がない太陽電池の場合）。この溶液には有毒物質であるシアン成分が少量ながら含まれているため輸送など取り扱いが難しいが、簡便な合成法や無毒化する分解装置も併せて開発した。<sup>21</sup>現在、日本の太陽電池メーカーに加えて、ドイツや韓国の関係先とも小林教授らが開発した技術を用いて太陽電池を製造することを検討している [5-6]。

### (ii) 太陽光発電の製造コスト低減技術

経済産業省のまとめによると、太陽光発電の設備は 2009 年末現在、世界全体で出力約 2038 万 kW に達する。欧州全体では、自然エネルギーによる電力の固定価格買い取り制度を設けたドイツとスペインがけん引役となり、急速に導入が進んだ。ただし、エネルギー全体に占める割合はドイツで 0.4%、スペインで 0.6% とまだまだ小さく、日本も 0.1% にとどまっている。

先述したように太陽光発電自体の技術的な向上と東日本大震災によるエネルギー事情から、今後、日本国内でもメガソーラー（大規模太陽光発電）の需要が増えることが予測される。海外メーカーとの競争<sup>22</sup>の中で、日本のメーカーも製造コスト低減は極めて重要な問題である。小林教授は国内企業と共同で、製造コストを大幅に下げる技術の実用

<sup>20</sup> 欠陥消滅型半導体洗浄法の利点は次のようにまとめられる：(i)エッチングを伴わない、(ii)低濃度水溶液を使用、(iii)室温での洗浄、(iv)再付着なし、(v)反復使用可能、(vi)半導体中の欠陥準位を消滅する機能あり。

<sup>21</sup> 半導体製品の製造工場では、まず無毒物質を購入して欠陥消滅型洗浄液を製造する。これを洗浄及び欠陥消滅に数回から数十回反復使用する。最後に洗浄液を二酸化炭素と窒素に分解し、完全無毒化して排出する。

<sup>22</sup> 日本は、2004 年まで世界第 1 位だったが、住宅用太陽電池への国の補助金が打ち切られた 2005 年、ドイツに首位を奪われ、2008 年にはスペインにも抜かれて 3 位になった。2009 年末現在の総出力約 263 万 kW は、ドイツの 4 分の 1 程度に留まる。太陽電池の生産も、2004 年までは世界の上位 5 社のうち 4 社が日本企業で、世界市場の約 5 割を占めていたが、その後は中国やドイツが大幅に伸び、2009 年は市場占有率 12.6% と 3 位に落ち込んだ。一方、台湾は現在、日本の太陽電池生産量の 2 倍程度のシェアを有する。

化を進めている。既に、簡単な化学反応によって太陽電池パネルの表面に微細な凸凹を刻んで光の吸収率を高めたり、パネルの洗浄液をリサイクル可能にしたりといった技術開発に成功した。[7]

### (iii) 液晶の消費電力の大幅低減

液晶パネルの表示方式の主流である TFT の駆動電力は、ゲート電極にある酸化膜の厚さとともに増加する。従来の CVD（化学的気相成長法）では、多結晶シリコンの上で作る酸化膜の厚さが不均一で特性も悪く、電圧の低減化が難しかった。多結晶シリコンを 120°C で 68% 以上の高濃度硝酸に入れて表面処理し酸化膜を作るという小林教授らが開発した“硝酸酸化法”によって、酸化膜の厚さが均一になりシリコンと酸化膜の接合面の品質も向上した。更に、ゲート電極の薄膜を厚さ約 10nm（従来は 50~100nm）に抑えることに成功し、これによって駆動電力を 1/12V に低減し、消費電力を 1/144 に下げることができた。この新技術は液晶ディスプレイの省電力化や太陽電池の発電効率の向上に役立つ。[8-9]

### (iv) 硝酸酸化プロセスの産業応用

先述したように、CREST で開発した硝酸酸化法は、低温で良好な電気特性を有する SiO<sub>2</sub>/Si 構造を形成できるという利点がある。2007 年からの CREST（2 回目）では、この利点を生かしてシステムディスプレイの超低消費電力化と TFT の微細化を行ったが、この技術は TFT に限らず、種々の半導体製品に応用できる。例えば、硝酸酸化法を用いてシリコン表面を不活性化することによって、シリコン太陽電池を高効率化することが可能である。共沸硝酸酸化法を用いてシリコン太陽電池を高効率化する研究は、小林教授らが国内外の太陽電池メーカーと共同研究・共同開発を行っている他、欧、豪、台湾、韓国などで盛んに研究されている。硝酸酸化法では、120°C の低温で酸化膜を形成できるため、従来の半導体製品の基板に使用することが困難であった PET などのプラスチック基板を使用出来る。このメリットを活かして、電子ペーパーやウェアブル PC・ディスプレイに利用することも可能である。この他、新情報端末、新アプリケーションデバイス、医療関係製品など種々の産業応用分野に利用できる可能性がある。

また、硝酸酸化装置の開発に際して硝酸漏洩を防ぐ気密性の確保や金属汚染の防止などに種々のノウハウを蓄積することが出来た [3]。現在、これらのノウハウを半導体装置メーカーに移転し、実用化に向けて開発段階にある。

### (b) 大学発ベンチャー設立

CREST で用いた欠陥消滅型半導体洗浄法は、JST 大学発ベンチャー推進事業に採択された後、2007 年 4 月に(株)KIT を大学発ベンチャーとして起業した。小林教授は取締役を

務める。事業内容は以下の通りである[10]：

- 半導体，セラミック，その他固体表面の表面化学処理の研究開発
- 上記表面化学処理技術を応用した製品の製造，販売，保守管理
- 上記表面化学処理技術に関する知的財産権およびノウハウの使用許諾と移管業務
- 上記表面化学処理技術のコンサルティング

#### (c) サイエンスセミナーの開催

JST のサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト (SPP) 事業の一環として，2003 年より毎年，奈良市立一条高等学校の生徒を阪大産研に招待し，「サイエンスセミナー」と銘打って太陽電池や光の物性に関する実験学習や研究設備の紹介を行っている [11]。小林研の学生も TA として参加している。実習に先立って小林教授が半導体についての出張授業も行っている。これは，大学で行っている研究の一端を高校生が自ら行うことで，より科学に親しむことができるようにとのねらいもある。

#### 参考文献

- [1] H. Kobayashi, A. Asano, S. Asada, Y. Yamashita, K. Yoneda, and Y. Todokoro, J. Appl. Phys. 83, 2098-2103(1998)
- [2] <http://www.jst.go.jp/tt/uventure/info/info1609/>
- [3] CREST 研究終了報告書，2010
- [4] CREST 研究終了報告書，2005
- [5] 日刊工業新聞 2010 年 6 月 22 日
- [6] 日経産業新聞 2010 年 6 月 22 日
- [7] 読売新聞 2012 年 1 月 16 日
- [8] 日経産業新聞 2010 年 12 月 9 日
- [9] 日刊工業新聞 2010 年 12 月 9 日
- [10] <http://www.jst.go.jp/tt/uventure/info/info1609/gaiyo.html>
- [11] <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/jp/operation/pdf/NO39.pdf>