

戦略的創造研究推進事業
CREST・さがけ複合領域
研究領域中間評価用資料

「エネルギー高効率利用と相界面」(さがけ)
「エネルギー高効率利用のための相界面科学」
(CREST)

研究総括: 花村 克悟

2016 年 2 月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	6
(3) 研究総括	7
(4) 採択研究課題・研究費	7
2. 研究総括のねらい.....	11
(1) 戦略目標に対する研究領域の狙い.....	11
(2) 本研究領域の狙い、研究成果として目指したこと.....	12
(3) 科学技術の進歩への貢献、科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと...	12
3. 選考について	13
(1) 課題選考方針	13
(2) 本研究領域における「選考の視点」	15
(3) 選考結果	15
(4) 研究課題構成	17
4. 領域アドバイザーについて.....	20
(1) さきがけ	20
(2) CREST	20
(3) 人選にあたっての考え方.....	21
5. 研究領域の運営について.....	21
(1) 研究総括の運営方針について.....	21
(2) さきがけ	21
(3) CREST	22
(4) バーチャルラボとしての研究領域のマネジメントについて.....	23
(5) 人材輩出や成長の状況について.....	24
(6) 研究費配分について研究領域運営上の立場から.....	25
6. 研究の経過と所見.....	26
(1) さきがけ	26
(2) CREST	34
7. 総合所見	38
(1) 研究領域のマネジメントについて.....	38
(2) 研究領域としての研究成果の見通し.....	38
(3) 本研究領域を設定したことの意義.....	39
(4) 今後への期待や展望.....	40
(5) 感想、その他	40

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「エネルギー利用の飛躍的な高効率化実現のための相界面現象の解明や高機能界面創成等の基盤技術の創出」

①達成目標

- (i) エネルギー高効率利用化に向けた相界面におけるエネルギー輸送・変換機構の解明
- (ii) ナノ、メソ、マクロなどの異なるスケールの相界面現象を総合的に解析・設計するためのモデリング、シミュレーション技術の創出
- (iii) 相界面構造を制御・最適化するための数理科学的な手法などの基盤技術の創出
- (iv) 機器やデバイスの理論的最高性能を実現するための高機能界面の創成

②将来実現しうる重要課題の達成ビジョン

様々なエネルギー機器等において必ず生じるエネルギー損失を極限まで減少させるためには、相界面科学に関する基礎に立ち返った研究が必要であることが、応用段階の研究開発プロジェクト等において指摘されている。相界面は多種に及ぶが、機能的には以下のように大別できる。

- (i) 熱流体力学的界面：流体力界面、伝熱界面、分離・吸着界面など
- (ii) 化学界面：化学反応界面、電気化学界面、光化学界面など
- (iii) 固体物理界面：熱電界面、光電界面、電子デバイス界面など

これら界面における現象の解明は、後述する環境エネルギー分野で研究開発目標となっている様々な新技術や既存の基盤技術において共通して現れる課題の解決に向けた重要な鍵となっている。本戦略目標により、相界面現象の基礎学理や制御・最適化技術を深化させることによって、相界面でのエネルギー損失を大幅に減少させることを可能とし、新しい相界面機能の発現機構の発見や創造への糸口を得ることを目指す。また、ナノ、メソ、マクロといった異なるスケールの現象を総合的に解析・設計するためのモデリングやシミュレーション、相界面構造を具体的に制御・最適化するための数理科学的手法などを開拓することにより、先端的な基礎研究の成果を実際の機器やシステムの設計に効果的に適用することを目指す。

このようにエネルギー輸送・変換に関わる基本的な現象の解明に向けて、既存の専門分野を越えてあるいは異なる分野の科学的知識を融合し、総合的に取り組むことによって機器の飛躍的性能向上、低炭素化、低コスト化を目指す。さらにそれらの広範かつ迅速な社会普及と産業振興を達成する道が拓かれることにより、グリーン・イノベーションの目標実現に向けた重要課題「エネルギー利用の高効率化及びスマート化」に幅広く貢献することを目指す。

なお本戦略目標はエネルギー輸送・変換を担うのみならず、社会の様々な生産・消費活

動にも関わる相界面科学の構築と深化を推進するものであり、その社会経済的成果は中長期的にみても多様な技術の優位性、卓越性として結実するものと言える。

研究成果の展開を目指す技術分野は以下のとおりである。なお、以下にあげた技術分野の他、エネルギー利用効率の抜本的改善に向けた課題の解決に貢献することが期待される。

(i) 複雑な熱流動制御による熱機関の極限的効率向上

エネルギー変換の大半を担う各種エンジンや火力発電プラント等の熱機関の不可逆損失のほとんどは、熱移動に伴う温度差と、圧縮・膨張行程の流動損失による。気体や液体の不規則な流れ（乱流）や沸騰などの気体／液体／固体相界面のミクロからマクロまでの熱物質輸送の素過程や、固体表面と液体との接触状態（濡れ性）等の表面性状の制御により、熱交換損失や流動損失が大幅に低減され、システムの理論的限界性能への到達度が向上し、大幅な低コスト化が達成される。

(ii) 輸送機器の摩擦抵抗削減による省エネルギー／二酸化炭素排出削減

大幅な二酸化炭素排出削減を課せられる運輸部門は、自動車はもちろんのこと、我が国の総排出量に無視し得ない割合を占める海運も視野に入れなければならない。乱流や、例えば気体と液体のように異なる二相が混ざりあった流れ（二相流）における気体／液体／固体界面での複雑流動を制御することで、自動車、船舶、さらには航空機等の大幅な抵抗低減を達成することが可能となり、省エネルギー、二酸化炭素排出削減、製品競争力の向上に貢献する。

(iii) 燃料電池や蓄電池等の電極界面反応機構解明及び相界面形態の最適化

燃料電池や蓄電池等マイクロ多孔質電極内では、例えば、ガス、イオン、電子の拡散と電気化学界面（固体／固体／気体）における反応が性能を決定している。この電気化学界面における素過程を高度なシミュレーションや先端計測技術に基づき解明することにより、多元系多孔質電極の相界面形態の最適化等、ブレークスルーが達成され、飛躍的な性能向上と低コスト化に貢献できる。

(iv) 伝熱・物質交換・相分離技術の高度化によるヒートポンプの革新

空調機やヒートポンプでは、効率改善や機器のコンパクト化、冷媒使用量の削減などが課題である。革新的な伝熱相界面、物質交換相界面、相分離相界面における素過程の解明に基づく最適設計技術と新たな製造技術を開発し、原点に立ち戻った基礎研究を行うことで課題解決に貢献する。

(v) 分離膜の構造の詳細解析及び孔径・相界面形態の高性能化

様々な種類の分離膜における液体／固体相界面の機能と形態を最適設計するために膜構造の精密な解析、表面性状や孔径の制御技術を開発し、飛躍的な性能向上と低コ

スト化に貢献する。

(vi) パワー半導体デバイスの界面制御による高効率化

半導体デバイスの多くは異なる物質の薄膜を重ねた多層膜構造で、異なる物質の間に存在する界面が多層膜の物性を左右する重要な因子である。半導体デバイスの高効率化には、表面に露出していない「埋もれた」構造である界面の基礎物理的な理解が不可欠である。異種固相界面の形成プロセスの体系的な基礎研究により、半導体界面におけるキャリア輸送損失を大幅に削減でき、SiC、GaN 等のワイドギャップ半導体素子を用いた電力制御用集積回路や LED 及び半導体レーザー等の飛躍的な性能向上と低コスト化に貢献する。

③具体的内容

エネルギーを利用する様々な機器やシステムに必ず存在する相界面での熱流体力学的、電気化学的、あるいは電磁気学的な現象は、機器の機能や性能を決定している。そして、エネルギー技術の理論的最高性能（限界性能）の実現を阻むエネルギー損失の多くはこの相界面で生じている。そこで、相界面を介して移動する種々のエネルギーキャリア（原子、分子、化学種、イオン、電子、フォトン、フォノンなど）の輸送過程あるいは他のキャリアに変換される素過程の解明、相界面を最適化、制御、製造するための設計技術の開発に向けた基礎研究に取り組む。具体的には、以下に大別する研究アプローチを想定する。

(i) 【アプローチ 1】相界面現象のプロセスおよび素過程の解明

エネルギーキャリアのフロー：伝導、拡散、放射、蒸発、昇華、化学反応、電荷移動、溶解、凝固、析出、散乱・反射等

界面の形態：2 相／3 相界面、p/n 接合、ショットキー接合、ヘテロ界面、量子ドット等非理想状態：欠陥、不純物、劣化、酸化、エロージョン・コロージョン、摩耗、変形、ファウリング等

(ii) 【アプローチ 2】相界面を最適化、制御、製造するための設計技術の開発

界面構成物質の選択、界面モルフォロジー（形状、キャビティ、微粒子、薄膜、コーティング、多孔質等）、反応過程、界面変形性能（弾性、粘弾性）などの多変数の最適化

マルチスケールのエネルギーキャリアフローの制御による損失低減

(iii) 【アプローチ 3】前 2 項を支える計測技術とモデリング・シミュレーションの高度化

ミクロ、メソ、マクロの素過程現象、それらの機構を解明するための計測技術
素過程のモデリングに基づく、マルチフィジックス、マルチスケール現象の数値シミュレーション、数理科学

④政策上の位置付け（政策体系における位置付け、政策上の必要性・緊急性等）

新成長戦略（2010 年 6 月 閣議決定）において、「グリーン・イノベーション」（環境エネルギー分野革新）を成長の原動力の一つとして、我が国のトップレベルの環境技術を普及・促進し、世界ナンバーワンの「環境・エネルギー大国」を目指すとされている。「グリーン・イノベーション」には、2020 年における温室効果ガスの 25%削減目標を掲げた地球温暖化対策も含まれており、成長戦略実行計画（工程表）では、低炭素化のためにエネルギー高度利用の推進があげられている。

「科学技術に関する基本政策について」に対する答申（2010 年 12 月 総合科学技術会議）においては「資源・エネルギーの制約（中略）等の問題は、中長期的には世界的に深刻かつ重大な課題となることが予想される。このためこれらの課題を世界に先駆けて克服」すること、また「エネルギー利用の高効率化及びスマート化」として「省エネルギー技術の開発」に関する研究開発を推進することとされている。

また、「平成 23 年度科学・技術重要施策アクション・プラン」（2010 年 7 月）において、「エネルギー供給・利用の低炭素化」あるいは「エネルギー利用の省エネ化」にあたっては、「多様な技術を多面的に展開すべき」であり、「これら各技術の有する温室効果ガス排出削減ポテンシャルを最大限に活かし、それぞれの特徴に応じた導入・展開を図るための研究開発と普及促進の取組が必要である」とされている。特に、太陽電池、蓄電池、燃料電池等に対して提示されている施策パッケージにおいて、基礎研究への立ち返りとその解決に向けた先端的・革新的な研究開発の重要性が指摘されている。

⑤他の関連施策との連携および役割分担・政策効果の違い

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が実施したエネルギー変換に関する研究開発プロジェクト等において、相界面科学に関する基礎研究に立ち返った取り組みの必要性が指摘されており、本戦略目標における基礎に立ち返った研究成果を活用することが期待される。具体的には、固体酸化物形燃料電池（SOFC）の電解質膜や電極触媒等の耐久性の向上や、広い温度範囲かつ低い加湿状況に対応できる固体高分子形燃料電池（PEFC）用の非貴金属電解質膜の開発が求められており、電解質膜や電極触媒層における相界面での劣化機構解明に関する基礎研究が必要とされている。二次電池に関しても、性能、信頼性の飛躍的な向上とコストの大幅低減のためには、電極－触媒間での物質輸送・反応メカニズムをサイエンスに立ち返って解明することが必要とされている。水素製造光触媒をはじめとする触媒反応システムにおいては、その場観察等の高度な計測解析手法によって過酷な実条件下での現象解明が重要な課題とされている。その他高効率火力発電においては低品位燃料の改質や不純物処理等が益々困難なものとなっており、混相流－壁面－触媒等の様々な相界面での熱・物質輸送現象を解明することが必要とされている。

界面制御に関連した主な研究開発としては、2009 年度に文部科学省が公募した「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発プログラム」があげられるが、当該プログラムは、拠点機関が企業等と協力して出口側の技術ニーズを抽出し、研究者を結集した産学官共同研

究拠点を構築することにより、先端的な計算科学や計測技術を活用した課題解決に取り組むものである。また、同拠点においては長期的視野の下、我が国のナノテク研究を担う人材育成も推進している。

本戦略目標では相界面を構成する材料研究に加えて、相界面におけるエネルギーと物質の輸送・反応に関する速度論的観点からの理解を重視している。また、上述した NEDO の例を始め、これまで実施されたプロジェクト等の研究開発において基礎研究への立ち返りが必要となった課題等を主な対象としてエネルギー問題解決に貢献する技術を相界面現象に関するナノ、メソ、マクロのスケールをカバーする研究開発から新技術シーズの創出を目指すものであり、上述した関連施策と目的や研究内容において相互補完関係にあり、研究成果の共有等の連携が期待される。

⑥科学的裏付け（国内外の研究動向を踏まえた必要性・緊急性・実現可能性等）

「ナノテクノロジー・材料分野 科学技術・研究開発の国際比較 2009 年版」（2009 年 5 月 JST 研究開発戦略センター）によれば、「エネルギー・環境分野は材料科学の進展と直結しており、その革新的な技術開発をもたらす可能性のあるナノテクノロジー・材料技術との融合は必須と言える」としている。また、「JST ナノテク関連プロジェクトに象徴されるように、物理、化学、材料・高分子など幅広い分野に界面・表面のサイエンス・テクノロジーの基礎研究が広がり成果につながっている。（中略）基礎研究が必ずしも“真”の基礎的、基盤的研究になっておらず、新しい研究や大きな革新的技術への展開につながっていない場合も多い」としている。

国際的な動向としては、ドイツが先行して相界面科学を重要視し、2007 年 11 月、連邦政府のエクセレンス・イニシアティブのもと、「国際的に競争力のある研究を行う中核的研究機関（クラスター・オブ・エクセレンス）」として「スマート・インタフェース・センター（CSI）」を設立し、化学、材料科学、数学、機械工学、物理の 5 部門の研究者の連携により、相界面の理解・設計にいち早く取り組んでいる。

JST 研究開発戦略センターにおける「高効率エネルギー利用社会を支える相界面の科学」ワークショップ（2010 年 8 月）では、多分野の研究者により具体的な研究開発課題及び推進方策等について検討が行われ、二次電池、燃料電池、熱電変換、水素製造光触媒等の飛躍的性能向上に向けて、相界面科学研究の推進の重要性と必要性が再確認されている。また新たなブレークスルーを生むためには、現象解明や材料開発に強い化学系研究者とシステム実現に優れた機械系研究者が超高効率エネルギー利用を目的に結集し、密接な連携と融合を図ることが有力な方法であるとしている。

⑦留意点

CREST の研究領域「ナノ界面技術の基盤構築」を始めとする分野横断的な研究領域（ナノテクノロジー、数理科学関連）など本戦略目標と関連する研究領域と連携し、事業全体として効果的・効率的に研究を推進することが必要である。

平成23年度戦略目標

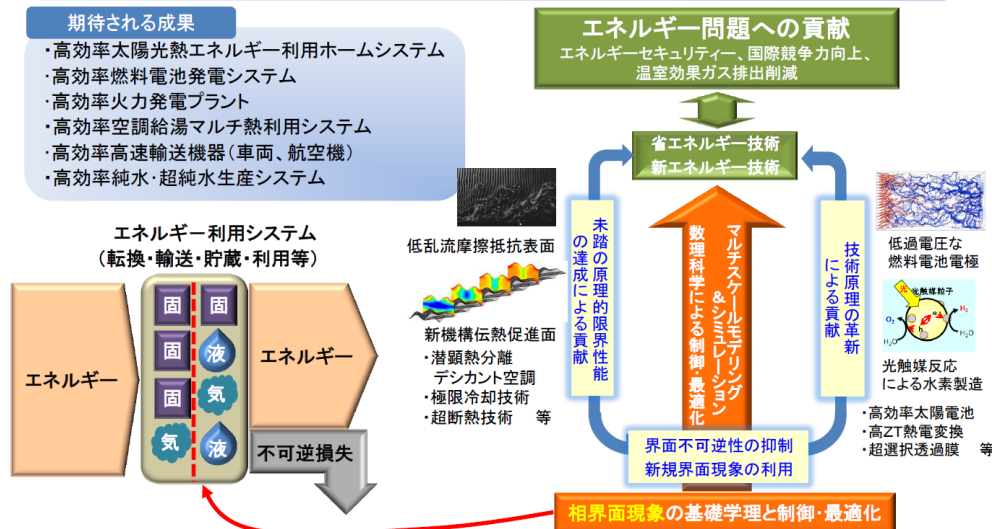
「エネルギー高効率利用に資する、相界面科学に基づく基盤技術の創出」

概要

本戦略目標では、エネルギー転換・輸送・貯蔵・利用プロセスに付随して生じる様々な相界面現象(吸着・吸蔵、触媒、電気化学、伝熱、熱電変換、光電変換)に着目し、その基礎学理と、それに基づいた、高機能界面の創成、モデリングおよびシミュレーション、制御・最適化のそれぞれに関わる基盤技術の創出に資する研究を推進する。

期待される成果

- ・高効率太陽光熱エネルギー利用ホームシステム
- ・高効率燃料電池発電システム
- ・高効率火力発電プラント
- ・高効率空調給湯マルチ熱利用システム
- ・高効率高速輸送機器(車両、航空機)
- ・高効率純水・超純水生産システム



(2) 研究領域

「エネルギー高効率利用と相界面」(さきがけ) 2011 年度発足

「エネルギー高効率利用のための相界面科学」(CREST) 2011 年度発足

本研究領域は、豊かな持続性社会の実現に向けて、エネルギー利用の飛躍的な高効率化を実現するため、エネルギー変換・輸送に関わる相界面現象の解明や高機能相界面の創成などの基盤的科学技術の創出を目的としている。

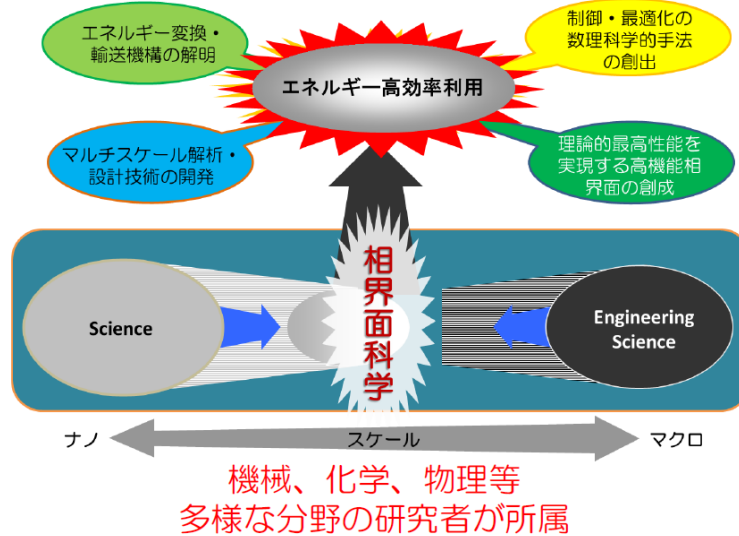
具体的には、様々な相界面現象の基礎学理や制御・最適化技術を深化させることによって、エネルギー損失の大幅な減少を可能とする相界面、あるいは高効率エネルギー利用のための新たな高機能相界面を創造することに挑戦する。そのためにはナノ、メソ、マクロといった異なるスケールの現象を統合的に解析・設計するための技法、相界面構造を制御・最適化するための理論的手法などを開拓することが必要である。さらに、これらの先端的な基礎研究の成果を、実際の機器やシステムの設計に効果的に適用し、それらの飛躍的性能向上、低炭素化、低コスト化に繋げることが重要である。

本研究領域では図に示したように、機械、化学、物理等の多様な分野の研究者による専門分野を超え、あるいは異なる分野の科学的知識を融合しサイエンス及びエンジニアリング・サイエンスの両面からのアプローチを行う。それによりエネルギーの高効率利用に向けた相界面におけるエネルギー変換・輸送機構の解明、マルチスケールの相界面現象を総合的に解析・設計するための計測、モデリング、シミュレーション技術の開発、相界面構造を制御・最適化するための数理科学的な手法などの基盤技術を創出すると共に、機器やデバイスの理論的最高性能を実現するための高機能相界面を創成することを最終目標とする。

領域の概要

平成23年度戦略目標

「エネルギー高効率利用に資する、相界面科学に基づく基盤技術の創出」



(3) 研究総括

「エネルギー高効率利用と相界面」（さきがけ）

橋本和仁（東京大学大学院・教授 2011年12月～2013年3月）

笠木伸英（科学技術振興機構・上級フェロー 2013年4月～2015年6月）

花村克悟（東京工業大学大学院・教授 2015年6月～）

「エネルギー高効率利用のための相界面科学」（CREST）

笠木伸英（東京大学大学院・教授 2011年12月～2015年6月）

花村克悟（東京工業大学大学院・教授 2015年6月～）

本研究領域は、さきがけが橋本和仁研究総括、CRESTが笠木伸英研究総括とし、また、それぞれが相互の副研究総括として緊密に運営する体制で2011年12月に発足した。その後、2013年3月に橋本和仁研究総括が公職に就任したことに伴い、さきがけ、CRESTとも笠木伸英研究総括、橋本和仁研究総括補佐の体制に移行した。さらに、笠木伸英研究総括から、一身上の都合による辞任の申し出を受け、2015年6月より、さきがけ領域アドバイザーであった花村克悟が、さきがけ及びCRESTの研究総括を務めている。

(4) 採択研究課題・研究費

①採択研究課題・研究費（さきがけ）

本研究領域では、2011年度11件（うち3件は5年型研究課題であり、さらにうち1件は大挑戦研究課題）、2012年度11件（うち1件は3年型大挑戦研究課題）、及び2013年度10件を採択し、合計では32件であった。

(百万円)

採択 年度	研究者	研究（開始）／中間評価時の 所属・役職	研究課題	研究費*
2011 年度	池田 勝佳	北海道大学大学院理学研究院 准教授／名古屋工業大学大学 院工学研究科 教授	【5 年型研究課題】 構造規制相界面における重たいフォ トンの利用	105
	伊藤 衡平	九州大学大学院工学研究院 教授	【5 年型研究課題】 高圧水電解三相界面における限界物 質輸送の実験的探究	64
	喜多 浩之	東京大学大学院工学研究科 准教授	SiC MOSFET の抵抗損失低減のための 界面制御技術	46
	塩見 淳一郎	東京大学大学院工学研究科 准教授	ナノ構造界面を利用した環境親和型 熱電半導体の創成	48
	柴田 直哉	東京大学大学院工学研究科 准教授	原子分解能電磁場計測電子顕微鏡法 の開発と材料相界面研究への応用	40
	関口 康爾	慶応大学理工学部 専任講師	【5 年型大挑戦研究課題】 超低電力マグノンデバイスの基盤技 術創出	108
	館山 佳尚	物質・材料研究機構 国際ナノ アーキテクトニクス研究拠点 グループリーダー	第一原理統計力学による太陽電池・ 光触媒界面の動作環境下電荷移動・ 励起過程の解明	37
	宮崎 晃平	京都大学大学院工学研究科 助教	金属－空気二次電池可逆空気極にお ける三相界面	40
	八代 圭司	東北大学多元物質科学研究所 准教授／同大学院環境科学研 究科 准教授	高効率エネルギー変換に向けた革新 的イオン機能界面設計	40
	保田 諭	北海道大学大学院理学研究院 講師／同 准教授	自己組織化集合能による高触媒活性 サイトのプログラマブル合成	40
2012 年度	安田 琢磨	九州大学大学院工学研究院 准教授／同大学稲盛フロンテ ィア研究センター 教授	液晶半導体のメゾスコピック超構造 を活用した有機電子デバイスの開発	46
	内田 健一	東北大学金属材料研究所 助 教／同 准教授	【3 年型大挑戦研究課題】 スピン流を用いた革新的エネルギー デバイス技術の創出	88
	大久保 貴志	近畿大学理工学部 准教授	強誘電性配位高分子複合界面の創製 と光電変換素子への応用	40

2012 年度	小林 厚志	北海道大学大学院理学研究院 助教／同 准教授	自己組織化を活用した超ナノ結晶人 工光合成デバイスの構築	40
	サン リウエ ン	物質・材料研究機構国際ナノア ーキテクト研究拠点 ICYS-MANA researcher／同独立 研究者	高効率光電変換デバイスの実現に向 けたⅢ族窒化物のマルチバンドエン 지니어リング	42
	竹中 壮	九州大学大学院工学研究院 准教授	金属酸化物層での被覆を利用した電 極触媒の高機能化	40
	津島 将司	東京工業大学大学院理工学研究 科 准教授／大阪大学大学 院工学研究科 教授	電極相界面極限利用を実現する高効 率フロー電池	42
	戸谷 剛	北海道大学大学院工学研究院 准教授	金属膜を持つ表面微細構造による放 射エネルギーの波長制御	40
	富岡 克広	科学技術振興機構さきがけ研 究者／北海道大学大学院情報 科学研究科 助教	新しい半導体固相界面による新規グ リーンデバイスの開発	40
	中山 将伸	名古屋工業大学大学院工学研 究科 准教授	リチウムイオン電池電極材料のセラ ミックス二相境界における物質移動 の動力学	28
	二本柳 聡史	理化学研究所基幹研究所 研 究員	埋もれた材料相界面研究のための極 限的非線形顕微分光法の開発	40
2013 年度	増田 卓也	物質・材料研究機構ナノ材料科 学研究拠点 特別研究員／同 主任研究員	固液界面その場XPS測定による酸 素還元反応機構の解明	51
	荒木 拓人	横浜国立大学大学院工学研究 院 准教授	界面微細センサ開発とマルチスケ ール数値解析による熱・物質輸送 - 電 気化学反応の連成現象の解明と最適 界面構造設計	40
	井上 元	京都大学大学院工学研究科 助教	カーボン導電剤とバインダーの構造 制御による電子物質輸送界面の高効 率化	40
	小野 倫也	大阪大学大学院工学研究科 助教／筑波大学計算科学研究 センター 准教授	計算科学的手法による省電力・低損 失デバイス用界面のデザイン	30
	狩野 旬	岡山大学大学院自然科学研究 科 講師／同 准教授	金属-強誘電体界面で実現する新形 態触媒デザイン	40

2013 年度	白澤 徹郎	東京大学物性研究所 助教	相界面の動的構造観察のための波長分散型表面X線回折計の開発と応用	38
	長津 雄一郎	東京農工大学大学院工学研究科 准教授	飛躍的な石油増進回収のための油水反応レオロジー界面の創成	40
	長藤 圭介	東京大学大学院工学研究科 講師	物質輸送と界面反応を最適にするための電極微細構造のメソスケール制御加工	40
	長野 方星	名古屋大学大学院工学研究科 准教授	多孔体内三相界面における熱流動解析に基づく熱輸送革新	40
	平山 朋子	同志社大学理工学部 准教授 ／同 教授	超低摩擦摺動メカニズムの解明と新規相界面の創成	38
	松井 雅樹	科学技術振興機構 さきがけ研究者／三重大学大学院工学研究科 准教授	マグネシウムイオンを用いた電気化学デバイス創成のための電極／電解質界面設計	44
総研究費				1,495

*研究費：2015年度上期までの実績額に2015年度下期以降の計画額を加算した金額

*終了課題の研究者の所属、役職は終了時のもの

②採択課題・研究費（CREST）

本研究領域では2011年度5件（うち1件は3年型研究課題）、2012年度4件、2013年度4件を採択し、全体としては13件であった。

（百万円）

採択 年度	研究代表者	研究（開始）／中間評価時の 所属・役職	研究課題	研究費
2011 年度	川田 達也	東北大学大学院 教授	実環境計測に基づく高温電極の界面領域エンジニアリング	380
	古山 通久	九州大学稲盛フロンティア研究センター 教授	固体酸化物形燃料電池電極の材料・構造革新のためのマルチスケール連成解析基盤	319
	高田 保之	九州大学大学院 教授	固気液相界面メタフルイディクス	389
	高柳 邦夫	東京工業大学大学院 特任教授	【3年型研究課題】 ナノとマクロの相界面と物質移動ナノサイクル	199
	陳 明偉	東北大学大学院 教授	界面科学に基づく次世代エネルギーへのナノポーラス複合材料開発	305

2012 年度	安部 武志	京都大学大学院 教授	多孔性電極中のイオン輸送現象の解明 と高出力電池への展開	392
	早瀬 修二	九州工業大学大学院 教授	酸化物半導体プリカーサーを用いる相 互侵入型無機・有機（無機）バルクヘ テロナノ界面の一括構築と太陽電池へ の応用	295
	宮武 健治	山梨大学大学院 教授	革新的アニオン導電性高分子を用いた 三相界面の創製とアルカリ形燃料電池 への展開	349
	山下 晃一	東京大学大学院 教授	エネルギー変換計算科学による相界面 光誘起素過程の設計	292
2013 年度	足立 幸志	東北大学大学院 教授	超低摩擦機械システムのためのトライ ボ化学反応を制御したナノ界面創	365
	小林 光	大阪大学産業科学研究所 教授	相界面制御法による極低反射率の達成 と結晶シリコン太陽電池の超高効率化	348
	長尾 忠昭	物質・材料研究機構 グルー プリーダー	セラミックスヘテロ層における界面電 磁場制御と熱エネルギー利用	289
	圓山 重直	東北大学大学院 教授	海洋メタンハイドレート層のマルチス ケール界面輸送現象の解明と大規模メ タン生成への展開	238
			総研究費	4, 160

* 研究費：2015 年度上期までの実績額に 2015 年度下期以降の計画額を加算した金額

* 終了課題の研究者の所属、役職は終了時のもの

2. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する研究領域の狙い

エネルギー技術に関連する種々の機器やシステムには、固体、液体、気体といった異なる状態や異なる物質が互いに接する境界（相界面）が必ず存在し、そこで生じる力学的、化学的、あるいは電磁気学的な現象を利用するものが多くある。一方、現実のエネルギー機器やシステムの性能は、その理論的最高性能（限界性能）に遠く及んでいない。これはエネルギーの変換、輸送、貯蔵プロセスにおける不可逆損失が主原因であり、また、それらの多くは相界面での現象に起因する。そこで、相界面での不可逆損失を大幅に削減することが、省エネルギー、すなわちエネルギー利用効率の向上を狙うすべての技術開発において本質的に重要と考えられる。

例えば、熱エネルギーシステムにおける乱流や沸騰などの複雑な熱流動制御や、輸送機器における摩擦抵抗低減による効率の向上、燃料電池や蓄電池などの電極界面反応機構の

解明と相界面材料・形態の最適化、太陽光による発電や燃料生産の素過程の解析と最適化、伝熱・物質交換・相分離技術の高度化によるヒートポンプの革新、分離膜の構造の詳細解析と孔径・相界面形態の高性能化、パワー半導体デバイスの界面制御による高効率化などの課題が存在する。

これらの課題を解決するためには、共通する相界面現象の基礎学理を深化させ、そこで得られた知識を基に理想的な界面を設計し、実証することが有効となると考えられる。もちろん、そのような相界面を具体的に作製・制御する技術の開発は必須である。一方、相界面は、ナノ、メソ、マクロのマルチスケール構造の各階層に存在する。ナノメートルでの現象解明や材料研究の成果を実システムに活かすためには、幅広いスケールの現象を総合的に解析・設計するための計測技術や、モデリングとシミュレーション技術のための工学や数理科学の開拓も必要である。そして、これらの分野の成果を統合することによって、機器やシステムのエネルギー損失の削減や、新たな省エネルギー機器、創エネルギー機器などの創造を図るとともに、関連技術の飛躍的な性能向上と低コスト化に資する成果の創出を狙う。

(2) 本研究領域の狙い、研究成果として目指したこと

本研究領域の狙いを達成するには様々な学術分野の連携や融合が欠かせず、分野を越えた研究者の協働が必須である。つまり、基礎科学としての研究だけに留まるのではなく、あるいは個別技術の改善だけに留まるのではなく、最終的な目標技術への道程を見通した上での基盤的研究課題の設定が必要である。

本研究領域では、材料系、化学系、機械系、電気系、システム系、さらには物理系、数理系など幅広い分野からの研究者や、それらの研究者が参画する研究チームを選び、これらの研究者間の連携、融合を実現するための端緒としては、主として相界面現象や材料機能の微視的詳細を基に高効率化を目指すアプローチ、あるいは具体的な実システム、構造やデバイスを基に高効率化を狙うアプローチ、といった道筋があると考え、これらのアプローチをとおして、広く異分野の研究者がエネルギー高効率利用を目的に結集し、新たなブレークスルー達成に挑戦していくことを目指す。「出口を見据えた課題設定」からさらに進めて「出口から見通した課題設定」により、エネルギー問題の解決に資する成果の創出を目指す（次ページ図参照）。

(3) 科学技術の進歩への貢献、科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと

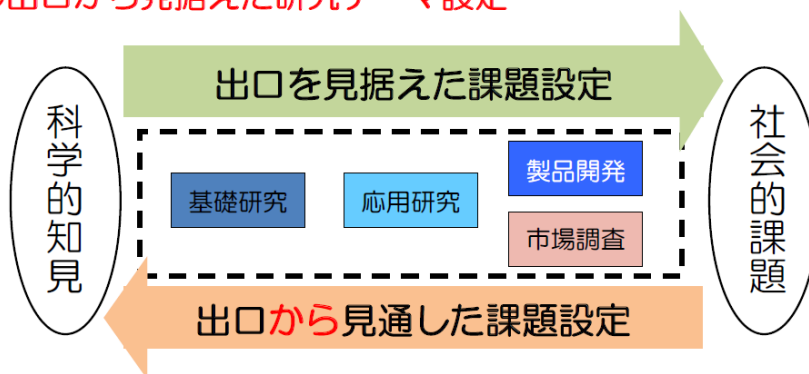
本研究領域の各研究課題において目標とするどのようなエネルギー技術の検討においても、実際の応用においては大量のエネルギーを扱い得ること、そして低コストであることが重要となる。従って、目標技術の革新性だけでなく、量的貢献も含めた観点からの課題設定を行い、社会実装に繋がる技術の開発を目指す。

また、相界面科学は人類のあらゆる生産・消費活動に関わっており、本研究領域推進による成果が、最終的にはエネルギー利用に限らず、広く他分野にも転用できる共通基盤的

な科学・技術として構築されることを目指す。

領域の特徴

○出口から見据えた研究テーマ設定



- ・研究者自身のオリジナル手法に固執しない
- ・出口から見て最適な手段の選定に独創性を

エネルギー問題への
定量的改善につながる基礎研究を推進

3. 選考について

(1) 課題選考方針

研究課題の選考にあたっては、研究領域の趣旨に沿った提案を選定するため、書面審査、及び面接審査の2段階方式とした。審査に際しては、応募研究課題の利害関係者の審査への関与を避け、申請者の他の大型研究助成との関係も考慮し、公正かつ厳正に行った。書面審査においては、領域アドバイザーに加えて、領域アドバイザーと同様の基準で選定した外部評価者も加わり、各応募研究課題に関し複数の査読者による査読・評価を行い、その結果から面接審査の対象者を選定した。面接審査は、応募者による口頭発表及び質疑応答を行い、その評価結果から多角的な検討を行った上で、採択研究課題を決定した。

審査にあたっては、下記の JST における「選考の観点」に加えて、本研究領域における選考の視点を加えて選定した。

【JSTにおける「選考の観点」】

さががけ

(1) さががけの各研究領域に共通の選考の基準

- a. 戦略目標の達成に貢献するものであること。
- b. 研究領域の趣旨に合致していること。
- c. 独創的・挑戦的かつ国際的に高水準の発展が見込まれる基礎研究であって、科学技術イノベーションの源泉となる先駆的な成果が期待できること。
- d. 研究提案者は、提案研究の内容、研究姿勢や他の研究者との議論・相互触発の取り組みを通じて、当該さががけ研究領域全体の発展ならびに関係研究分野の継続的な発展への貢献が期待できる存在であること。
- e. 以下の条件をいずれも満たしていること。
 - ・ 研究提案の独創性は、研究提案者本人の着想によるものであること。
 - ・ 研究構想の実現に必要な手掛かりが得られていること。
 - ・ 個人型研究として適切な実施規模であること。

(2) 上記のほか、研究領域ごとに独自の選考の観点・方針や運営の方針などを設定しました。

(3) 研究費の「不合理な重複」ないし「過度の集中」にあたるかどうか、選考の要素としました。

CREST

(1) CREST の各研究領域に共通の選考の基準

- a. 戦略目標の達成に貢献するものであること。
- b. 研究領域の趣旨に合致していること。
- c. 独創的であり国際的に高く評価される基礎研究であって、今後の科学技術イノベーションに大きく寄与する卓越した成果が期待できること。
- d. 以下の条件をいずれも満たしていること。
 - ・ 研究提案者は、研究遂行のための研究実績を有していること。
 - ・ 研究構想の実現に必要な手掛かりが得られていること。
 - ・ 研究提案書において、①研究構想の背景(研究の必要性・重要性)、②研究提案者の実績(事実)、及び③研究構想・計画の3者を区別しつつ、それぞれが明確に記述されていること。
 - ・ 最適な研究実施体制であること。研究提案者がチーム全体を強力に統率して責任を負うと共に、主たる共同研究者を置く場合は研究提案者の研究構想実現のために必要不可欠であって、研究目的の達成に向けて大きく貢献できる十分な連携体制が構築されること。
 - ・ 研究提案者の研究構想を実現する上で必要十分な研究費計画であること。
 - ・ 研究提案者および主たる共同研究者が所属する研究機関は、当該研究分野に関する研究開発力などの技術基盤を有していること。

(2) 上記のほか、研究領域ごとに独自の選考の観点・方針や運営の方針などを設定しました。

(3) 研究費の「不合理な重複」ないし「過度の集中」にあたるかどうか、選考の要素としました。

(4) 知的財産の取得・活用に対する考え方の提示も選考の要素としました。

(2) 本研究領域における「選考の視点」

最重要事項：

- ①エネルギー高効率利用に向けた優れた基礎研究提案を選ぶ。
- ②優れた若手研究者を選ぶ（さきがけ）。
- ②’複数の学術領域の連携するチームによる挑戦的な計画となっているものが望ましい。
また、将来的に異分野連携に発展できる可能性があるものを選ぶ（CREST）。

評価の基準：

- ③多数の申請に対し、採択件数、面接審査対象とも限られた件数となる。面接審査を含めて十分な評価を行うため、書面審査では絶対的な評価であるが、数量的な目安も含める。
※さきがけに関しては、3年計画、5年計画の研究提案は区別せず、それぞれの提案の優劣において評価を行う。
- ④エネルギーは社会的な期待の大きな課題、あるいはわが国が抱える主要課題のひとつであり、それらの解決に結びつく目的基礎研究を、国として集中投資して推進する事業であることに留意する。従って、研究者個人の動機だけで駆動される基礎研究、その推進制度としての科研費とは本質的に異なる。
- ⑤エネルギーの量的貢献、あるいは低コスト化による広い市場普及に繋がる技術目標を見据えた基礎研究であることが必要である。
- ⑥研究課題としては、
 - (i) 界面現象のプロセス・素過程の解明
 - (ii) 相界面の設計（最適化，制御）
 - (iii) 計測技術とモデリング・シミュレーションの3項目をあげているが、(i)、(iii)については新しい科学知識の獲得や、一般的な解析ツールの開発に留まる研究は対象としない。具体的な目標技術へ結実し、エネルギー高効率利用に大きく貢献する、明確な道筋を有する研究課題であることが必要である。

(3) 選考結果

本研究領域では2011年度、2012年度及び2013年度の3年度にわたって公募を行い、その応募数、採択数は、さきがけでは2011年度255件中11件、2012年度127件中11件、2013年度104件中10件であり、全体としては486件中32件であった。また、CRESTは2011年度119件中5件、2012年度51件中4件、2013年度24件中4件となっており、全体としては194件中13件であった。

さきがけは採択時においては32名中27名が大学、3名が国立研究機関（3名ともポスドク）、さきがけ専任研究者が2名の構成であった（現時点では3名のポスドク研究者、2名のさきがけ専任研究者のすべてが大学・国立研究機関等でのポストに就任している）。また、

女性研究者 2 名、外国人研究者 1 名を含んでいる。

CREST は 13 研究課題のうち 11 チームは複数の大学等を含む研究グループから構成されており、また 2 チームには企業の研究グループが参加している。

①さきがけ

年 度		3 年型	5 年型	総数
2011 年度 (第一期生)	応募件数	205(11)	50(9)	255(20)
	採択件数	8(0)	3(1)	11(1)
2012 年度 (第二期生)	応募件数	127(15)	0(0)	127(15)
	採択件数	11(1)	0(0)	11(1)
2013 年度 (第三期生)	応募件数	104(0)	0(0)	104(0)
	採択件数	10(0)	0(0)	10(0)
合 計	応募件数	436(26)	50(9)	486(35)
	採択件数	29(1)	3(1)	32(2)

(括弧内：大挑戦型を内数で記載。2011 年度採択の 5 年型研究課題のうち 1 件は 3 年で終了、また 2012 年度採択の研究課題のうち 1 件は 5 年型に延長した。)

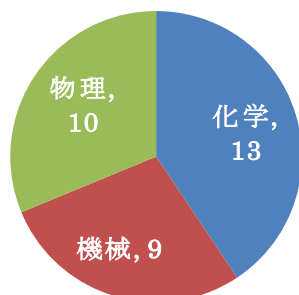
②CREST

年 度		総数
2011 年度 (第一期採択)	応募件数	119
	採択件数	5
2012 年度 (第二期採択)	応募件数	51
	採択件数	4
2013 年度 (第三期採択)	応募件数	24
	採択件数	4
合 計	応募件数	194
	採択件数	13

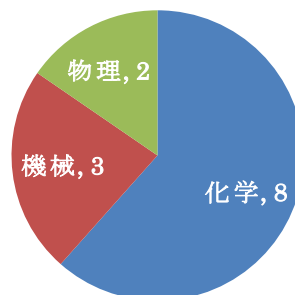
③研究者の分野分類

本研究領域の運営の狙いから、異なる分野の研究者集団による構成を意図した。その結果、下図に示すように、さきがけの研究者は化学系 13 名、機械系 9 名、物理系 10 名の合計 32 名であり、本研究領域にふさわしく多岐にわたっている。一方、CREST の研究代表者は化学系 8 名、機械系 3 名、物理系 2 名の構成であるが、多くの研究チームではチーム内に異分野の研究者を含んでいる。また、化学系の研究代表者がやや多いが、これらの研究課題のうち 2 研究課題には企業研究グループを含むこと、また実験的アプローチと理論・計算科学的アプローチが共存すること等で、多様性が図られている。

さきがけ研究者の専門領域



CREST研究代表者の専門領域

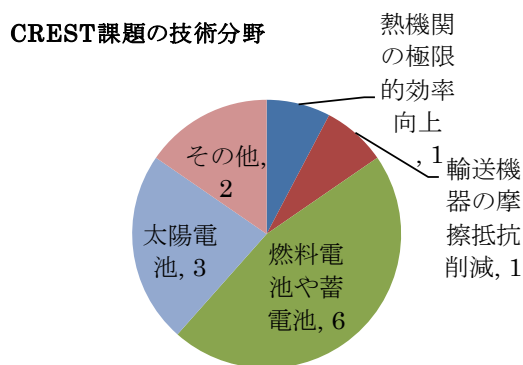
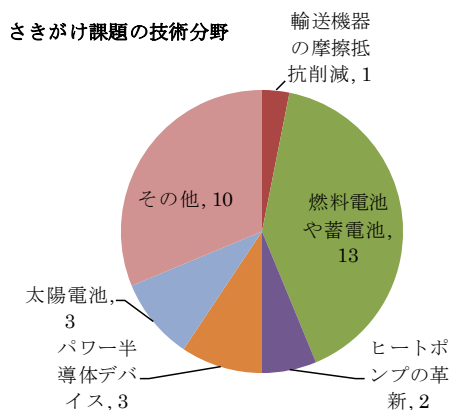


(4) 研究課題構成

採択した各研究課題の技術分野を、「戦略目標」にあげられている6つの技術分野に「太陽電池」を加えた7分野で下図に表した。当初の狙い通り、多くの技術領域を含めることができた。また、「その他」に分類したテーマの中には、スピン波(2件)、熱電素子、人工光合成、熱放射制御(2件)、エネルギー資源採掘(2件)等の種々の技術分野に関する研究課題を含んでいる。尚、戦略目標にあげられている技術分野のうち、「分離膜」に関する直接的な研究課題は応募件数が少なく、その中から1件の研究課題について「特定課題調査」とし、1年間の調査を実施した上で再度の審査を行ったが、採択に至らなかった。

さきがけの研究課題は、個人研究であることから、研究費、研究期間とも限られるため、その多くは、1. (1)に記述した達成目標4項目のうち、1項目、又は2項目への寄与に限られる(次ページ表参照)。また、基礎的分野の研究が中心となっており、本さきがけ研究期間中に「数理科学的な手法等」に十分に寄与できる課題はないが、いくつかの研究課題は将来、寄与することが期待される。

CRESTの研究課題は、機構の解明、それに関する解析、シミュレーション、さらにその結果を受けての高性能界面の設計、創生の過程を含み、単一の研究課題で複数の達成目標を含む。



【さきがけ】 研究課題と「達成目標」の関係

氏名	戦略目標(達成目標) 研究課題	○エネルギー 高効率利用化 に向けた相界 面におけるエ ネルギー輸 送・変換機構 の解明	○ナノ、メソ、マ クロなどの異な るスケールの 相界面現象を 総合的に解 析・設計するた めのモデリン グ、シミュレ ーション技術の創 出	○相界面構 造を制御・最 適化するた めの数理科 学的な手法 などの基盤 技術の創出	○機器やデバ イスの理論的 最高性能を実 現するための 高機能界面の 創成
池田 勝佳	構造規制相界面における重たいフォトン利用	○			
伊藤 衡平	高圧水電解三相界面における限界物質輸送の実験的探究	○	○		
喜多 浩之	SiC MOSFETの抵抗損失低減のための界面制御技術	○			○
塩見 淳一郎	ナノ構造界面を利用した環境親和型熱電半導体の創成		○	○	○
柴田 直哉	原子分解能電磁場計測電子顕微鏡法の開発と材料相界面研究への応用		○		
関口 康爾	超低電力マグノンデバイスの基盤技術創出	○			○
館山 佳尚	第一原理統計力学による太陽電池・光触媒界面の動作環境下電荷移動・励起過程の解明		○	○	
宮崎 晃平	金属-空気二次電池可逆空気極における三相界面	○			
八代 圭司	高効率エネルギー変換に向けた革新的イオン機能界面設計	○			
保田 諭	自己組織化集合能による高触媒活性サイトのプログラマブル合成	○			
安田 琢磨	液晶半導体のメソスコピック超構造を活用した有機電子デバイスの開発	○			○
内田 健一	スピン流を用いた革新的エネルギーデバイス技術の創出	○			○
大久保 貴志	強誘電性配位高分子複合界面の創製と光電変換素子への応用	○			
小林 厚志	自己組織化を活用した超ナノ結晶人工光合成デバイスの構築	○			
SANG Liwen	高効率光電変換デバイスの実現に向けたIII族窒化物のマルチバンドエンジニアリング	○			
竹中 壮	金属酸化物層での被覆を利用した電極触媒の高機能化	○			○
津島 将司	電極相界面極限利用を実現する高効率フロー電池	○	○	○	○
戸谷 剛	金属膜を持つ表面微細構造による放射エネルギーの波長制御	○	○		○
富岡 克広	新しい半導体固相界面による新規グリーンデバイスの開発	○			○
中山 将伸	リチウムイオン電池電極材料のセラミックス二相境界における物質移動の動力学		○		○
二本柳 聡史	埋もれた材料相界面研究のための極限的非線形顕微分光法の開発		○		
増田 卓也	固液界面その場XPS測定による酸素還元反応機構の解明		○		
荒木 拓人	界面微細センサ開発とマルチスケール数値解析による熱・物質輸送 - 電気化学反応の連成現象の解明と最適界面構造設計		○	○	
井上 元	カーボン導電剤とバインダーの構造制御による電子物質輸送界面の高効率化		○	○	
小野 倫也	計算科学的手法による省電力・低損失デバイス用界面のデザイン		○		
狩野 旬	金属-強誘電体界面で実現する新形態触媒デザイン	○			
白澤 徹郎	相界面の動的構造観察のための波長分散型表面X線回折計の開発と応用		○		
長津 雄一郎	飛躍的な石油増進回収のための油水反応レオロジー界面の創成	○			
長藤 圭介	物質輸送と界面反応を最適にするための電極微細構造のメソスケール制御加工	○	○	○	
長野 方星	多孔体内三相界面における熱流動解析に基づく熱輸送革新	○	○		
平山 朋子	超低摩擦摺動メカニズムの解明と新規相界面の創成	○			○
松井 雅樹	マグネシウムイオンを用いた電気化学デバイス創成のための電極/電解質界面設計	○			

【CREST】研究課題と「達成目標」の関係

氏名	戦略目標(達成目標)	○エネルギー 高効率利用化 に向けた相界 面におけるエ ネルギー輸 送・変換機構 の解明	○ナノ、メソ、マ クロなどの異な るスケールの 相界面現象を 総合的に解 析・設計するた めのモデリン グ、シミュレー ション技術の創 出	○相界面構 造を制御・最 適化するた めの数理科 学的な手法 などの基盤 技術の創出	○機器やデバ イスの理論的 最高性能を実 現するための 高機能界面の 創成
	研究課題				
川田 達也	実環境計測に基づく高温電極の界面領域エンジニアリング	○	○	○	○
古山 通久	固体酸化物形燃料電池電極の材料・構造革新のためのマルチスケール連成解析基盤		○	○	○
高田 保之	固気液相界面メタフルイデックス	○	○		
高柳 邦夫	ナノとマクロの相界面と物質移動ナノサイクル		○		
陳 明偉	界面科学に基づく次世代エネルギーへのナノポーラス複合材料開発	○	○		○
安部 武志	多孔性電極中のイオン輸送現象の解明と高出入力電池への展開	○	○	○	○
早瀬 修二	酸化物半導体ブリカーサーを用いる相互侵入型無機・有機(無機)バルクヘテロナノ界面の一括構築と太陽電池への応用	○	○		○
宮武 健治	革新的アニオン導電性高分子を用いた三相界面の創製とアルカリ形燃料電池への展開	○			○
山下 晃一	エネルギー変換計算科学による相界面光誘起素過程の設計	○	○		
足立 幸志	超低摩擦機械システムのためのトライボ化学反応を制御したナノ界面創	○	○		○
小林 光	相界面制御法による極低反射率の達成と結晶シリコン太陽電池の超高効率化	○			○
長尾 忠昭	セラミックスヘテロ層における界面電磁場制御と熱エネルギー利用	○	○		○
圓山 重直	海洋メタンハイドレート層のマルチスケール界面輸送現象の解明と大規模メタン生成への展開	○	○		

4. 領域アドバイザーについて

(1) さきがけ

氏名	2015 年 11 月時点の所属	役職	任期
魚崎 浩平	物質・材料研究機構	フェロー	2010 年 12 月～
岡島 博司	トヨタ自動車(株)技術統括部	主査	2010 年 12 月～
加藤 昌子	北海道大学大学院理学研究院	教授	2010 年 12 月～
金村 聖	首都大学東京大学院都市環境科学研究科	教授	2010 年 12 月～
功刀 資彰	京都大学大学院工学研究科	教授	2010 年 12 月～
佐藤 勝昭	科学技術振興機構	研究広報主監	2015 年 7 月～
高木 英典	東京大学大学院理学系研究科	教授	2010 年 12 月～2015 年 7 月
竹中 信之	奈良女子大学男女共同参画推進室	キャリアコーディネーター	2010 年 12 月～
中込 秀樹	千葉大学大学院工学研究科	教授	2010 年 12 月～
花村 克悟	東京工業大学大学院理工学研究科	教授	2010 年 12 月～2015 年 6 月
山田 明	東京工業大学大学院理工学研究科	教授	2010 年 12 月～
吉田 英生	京都大学大学院工学研究科	教授	2010 年 12 月～

* 退任した領域アドバイザーの所属、役職は退任時のもの

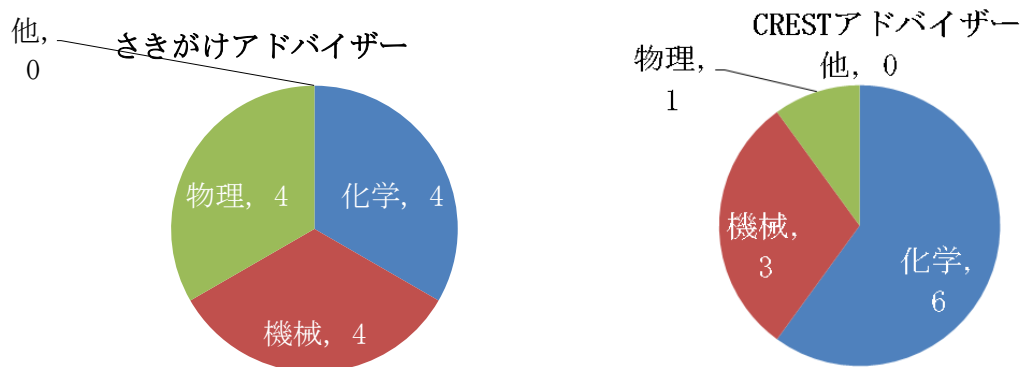
(2) CREST

氏名	2015 年 11 月時点の所属	役職	任期
江口 浩一	京都大学大学院工学研究科	教授	2010 年 12 月～
岡崎 健	東京工業大学	特命教授	2010 年 12 月～
加藤 千幸	東京大学生産技術研究所	教授	2010 年 12 月～
栗原 和枝	東北大学多元物質科学研究所	教授	2010 年 12 月～
齋川 路之	電力中央研究所エネルギー技術研究所	副研究参事	2010 年 12 月～
中戸 義禮	大阪大学産業科学研究所	特任教授	2010 年 12 月～2015 年 3 月
萩原 剛	東芝 電力・社会システム技術開発センター企画管理室	室長	2010 年 12 月～
宮野 健次郎	物質・材料研究機構	フェロー	2010 年 12 月～
吉田 真	京セラ(株)部品研究開発統括部	統括部長	2010 年 12 月～
渡辺 政廣	山梨大学社会連携・研究支援機構	特任教授	2010 年 12 月～

* 退任した領域アドバイザーの所属、役職は退任時のもの

(3) 人選にあたっての考え方

本研究領域は材料系、化学系、機械系、電気系、システム系、さらには物理系、数理系の広い領域に亘る課題設定を想定していることから、全体としてそれらの領域を包含する化学系、機械系、物理系を中心とする第一線の研究者の中から人選し、就任依頼した（次ページ図参照）。また、合同で開催する領域会議、評価会、及び個別研究課題議論に際しては、相互の領域アドバイザーにも参画の協力を依頼した。さらに、本研究領域はエネルギーの量的貢献、あるいは低コスト化による広い市場普及に繋がる技術目標を見据えた基礎研究を目指すことから、企業の研究者 5 名や企業出身の研究者 5 名が領域アドバイザーとして就任し、研究の視点に加えて産業化へのつながりの視点も含めて、アドバイス・評価を行った。



5. 研究領域の運営について

(1) 研究総括の運営方針について

2011 年度より 3 年間にわたり、さきがけ 32 研究課題、CREST13 研究課題を採択した。すべての研究課題に対し、本研究領域の趣旨のひとつであるエネルギーの量的貢献、あるいは低コスト化による市場普及に繋がる技術目標を見据えた基礎研究を推進することを重視した。

(2) さきがけ

さきがけ研究者に対しては、研究課題の達成はもとより、異なる専門分野に視野を広げ、人脈を形成し、サイエンスの視点に加えて、「出口から見通した課題設定」の考えを併せ持った研究者への育成も重視している。以下の機会を通じて、研究課題の方向性、進め方に関する議論を行い、必要な場合にはその見直しを行うとともに、研究者として教育・育成することを重視した。

研究課題の採択後、まず行ったキックオフミーティングは、CREST の採択課題と併せて行うことで、CREST のテーマを知るとともに、CREST の領域アドバイザーからも幅広く指導される機会を持った。また、年間に 2 回実施する合宿形式の領域会議のうち 1 回はさきがけ

研究者中心に開催し、密度の濃い研究議論や研究者相互の情報交換の機会とし、さらに、CREST 研究チームから若手研究者の参加も促すことで、相互の情報交換を行うとともに、将来のさきがけ研究への応募を動機づけた。また、もう 1 回の領域会議は CREST と合同で開催することで、更なる情報交換の機会としつつ、深い議論につながることを期待した。これらの領域会議では、会議中の議論、アドバイスに加えて、各領域アドバイザーからのコメントを文書で各研究者に提供することで、研究の進め方への指導を行った。

また、研究総括、及び専門領域のアドバイザーに加えて、技術参事、研究領域担当スタッフを同行したサイトビジットにおいて、研究の進捗状況に加えて、その研究環境を施設、設備、さらに人的構成等も含めて視察の上、確認を行うことで、研究課題の指導や予算運営等の基本的情報を取得した。また併せて、所属上長への挨拶、趣旨説明を、また所属機関の事務担当への協力依頼を行うことで、円滑な運営への準備を行った。

本研究領域の最も特徴とすることは、月例の研究発表会（「さきがけ研究会」と呼称）である。これは、さきがけ研究者全員に出席を義務付け、毎回 3 名、又は 4 名の研究者が各 50 分（Q&A を含む）の研究発表を行うことで、研究の進捗状況を把握し、研究の進め方を指導している。各研究者にとっては、領域会議と併せて、年間に 4 回から 5 回の議論の機会となり、必要な場合には、研究の目標、方向性、進め方に関する見直しを指導した。併せて、参加する各研究者にとっては、他者の発表、指導に接する貴重な機会であり、また、他者の研究発表に対しても活発に質問することを強力に指導したことで、多くの研究者に「出口から見通した課題設定」の考え方を浸透させる機会となり、32 研究課題のうち、7 割近い研究課題に関して、その研究の進め方の見直しを行った。

また、継続的な指導が必要と判断した研究課題に関しては、研究者自身の自主性、発想を十分に尊重しつつ、特定の領域アドバイザーによる「マンツーマン」によるサポートも実施している。

さらに、さきがけ研究者による自主的な研究会、交流も奨励した。「ナレッジマイニング研究会」と称し、各研究者のバックグラウンドやさきがけ研究以外の研究テーマを紹介し合い、相互に議論することで視野を拡大し、また研究交流（情報交換、共同研究）を増やす機会とした。また、現在、エネルギー問題のひとつの重要課題である CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」研究領域の若手研究者との合同ワークショップの開催に向け、相互のメンバーでの議論を進めている。

(3) CREST

CREST においてもさきがけと同様に、「出口から見通した課題設定」の考え方について徹底した指導を行った。

研究課題採択後にまず実施したキックオフミーティングは、さきがけの採択研究課題と併せて行うことで、さきがけのテーマを知るとともに、さきがけの領域アドバイザーからも幅広く指導してもらう機会を持った。また年間に 2 回実施する領域会議のうち 1 回は CREST 研究チームで開催し、密度の濃い研究議論や研究者相互の情報交換の機会とし、もう

1回の領域会議はさがけと合同合宿形式で開催することで、各研究チームから多数の研究参加者の出席を求め、更なる情報交換の機会としつつ、深い議論につながることを期待した。これらの領域会議では、会議中の議論、アドバイスに加えて、各領域アドバイザーからのコメントを文書で各研究者に提供することで、研究の進め方への指導を行った。

研究総括、及び専門分野の領域アドバイザーに加えて、技術参事、研究領域担当スタッフを同行したサイトビジットにおいて、研究の進捗状況に加え、その研究環境を施設、設備、さらに人的構成等も含めて視察の上、確認を行うことで、研究課題に関する議論や予算運営等の基本的情報を取得した。また、所属機関の事務担当への協力依頼を行うことで、円滑な運営への準備を行った。

CREST においてもさがけと同様に、「出口から見据えた課題設定」の考え方の徹底した指導を行った。

CREST の各研究チームで開催する個別の研究会には、研究総括は可能な場合には出席し、また、出席できない場合には、技術参事や研究領域担当スタッフの参加を促すことで、研究の進捗状況や研究環境上の課題等の把握に努めた。

(4) バーチャルラボとしての研究領域のマネジメントについて

研究領域内での連携(情報交換、共同研究)を積極的に進めた。代表的なものは以下である。

①さがけ研究者間の連携例

(i) 塩見研究者/内田研究者

固体伝熱を中心とするマルチスケールシミュレーションをベースとする塩見研究者と、スピン流のエネルギーへの応用をベースとする内田研究者の両者の新たな発想により、熱電変換性能の向上の検討を進めている。

(ii) 安田研究者/館山研究者

安田研究者の有機半導体の合成研究と、館山研究者の理論計算により、新たな化合物の材料設計指針、特性予測を進めている。

②CREST 研究チーム間の連携例

(i) 川田チーム/古山チーム

SOFC 電極に関し、解析的・実験的アプローチを行う川田チームと、理論・計算科学的アプローチを行う古山チームは、研究会を合同で開催し、双方のアプローチをすり合わせつつ、連携して研究を進めている。なお、この研究会にはさがけ研究者も出席している。

(ii) 小林チーム/安部チーム

シリコン太陽電池にベースをおく小林チームのシリコン切粉から創製するシリコンナノ粒子を用いる負極材料に関し、リチウム電池にベースを持つ安部チームが、その特性評価に協力している。

(iii) 長尾チーム/圓山チーム

赤外線吸収の物理現象をベースとする長尾チームと、熱放射・非接触温度計に経験を持つ圓山チームが協力し、新たな非接触・赤外線温度計の開発に向かっている。

③CREST 研究チームとさきがけ研究者間の連携例

(i) 高柳チーム

高度な顕微鏡技術をもつ高柳チームは、当研究領域のさきがけ研究者と、リチウム電池正極材料の理論計算からの探索、SOFC 用電極触媒開発の各テーマにおいて、サンプル測定、解析の面から協力・支援している。

(ii) 川田チーム

SOFC をテーマとする八代研究者と、CREST 川田チームが広く連携している。

(iii) 高田チーム

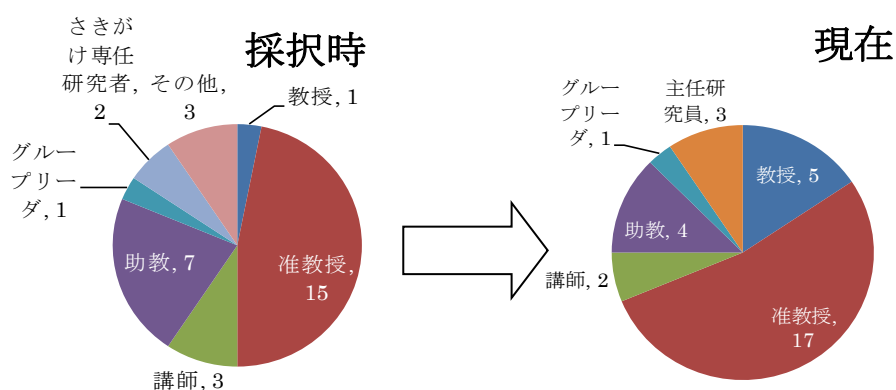
プール沸騰現象をベースとする高田チームに、塩見研究者が理論計算で参画している。

(5) 人材輩出や成長の状況について

さきがけでは、採択の視点のひとつに「優れた若手研究者」を加えており、採択時には准教授、講師、助教、さらにポスドク 3 名、ポスト就任前の JST さきがけ専任研究者 2 名という若手研究者が中心であった。その後の成長は著しく、教授に 4 名が昇進する等、昇任又はポストに就任し、現在では、ポスドク研究者、さきがけ専任研究者とも 0 名である（次ページ図参照）。

また、本さきがけ研究の成果等により、先端計測、SIP、NEDO、ACCEL の FS 等、さきがけ後のプロジェクト獲得にもつながっている。さらに、教育・育成による効果も挙がっており、多くの研究者が自らの苦労による成長を自覚している。

CREST では、研究開始時点で既に研究代表者は教授、グループリーダーとして活躍しており、研究代表者の昇進はない。しかしながらチーム内の研究者については、プロジェクト推進中の昇進及び独立が、全体の半分近くのチームにおいてみられ、独立・異動した場合には、チーム内の一メンバーから主たる共同研究者として研究を推進していく例も多い。また、ポスドク育成にも注力し、キャリアパスの支援を行っている。



(6) 研究費配分について研究領域運営上の立場から

さきがけにおいては、月例の研究会、領域会議等において研究の進捗を把握、評価する中で、「成果をあげているテーマを更に加速する」という原則により、現在までに 11 件、約 52 百万円の研究費増額を行っている。また、研究領域内の異分野の研究者間での相互の研究に対する理解も深まり、相互の特徴を生かせる共同研究の推進も奨励した結果、研究領域内における研究議論に加えて、個別の情報交換、装置・技術の相互補完等が活発に行われ、その中から具体化した共同研究テーマのうち、成果の期待できる 2 テーマに対し、それにかかわる研究費の増額を行った（下表参照）。

概要（さきがけ）	金額(千円)
研究加速	51,918
研究領域内共同研究	10,600
大挑戦	40,800
早期終了	-31,096
増額	103,318
減額	-31,096
差し引き合計	72,222

CREST においても、領域会議、研究課題中間評価において研究進捗を確認し、さきがけと同様に「成果をあげているテーマを更に加速する」という原則により、研究費増額を行っている。

特に研究課題中間評価においては、「選択と集中」の観点から、成果のあがっているテーマを加速するとともに、必要な場合には、研究計画、及び研究チーム見直しの対応をすすめている（下表参照）。

概要（CREST）	金額(千円)
研究加速	178,000
内、国際化支援	5,760

内、先端計測機器	45,000
研究領域内共同研究	0
早期終了	0
増額	178,000
減額	0
差し引き合計	178,000

6. 研究の経過と所見

(1) さきがけ

①研究総括の狙いに対する研究の状況

エネルギー利用の飛躍的な高効率化実現に向けて、ボトルネックとなる相界面現象の基礎学理を深化させ、そこで得られた知識を基に理想的な界面を設計し実証する、といったいわば出口から後方を振り返り課題を抽出することをおして、例えば相界面におけるエネルギー損失の大幅削減を可能とするなど、新しい相界面機能の発現機構の発見や創造への糸口を得ることを目指した研究が、機械、電気化学、電気電子などの分野の垣根を越えて進められている。

以下に、中間評価または事後評価を終えた 2011 年度及び 2012 年度採択研究者の特筆すべき研究成果を記す。

池田 勝佳研究者：

光エネルギーの有効利用に関連して、特にエネルギー密度の希薄な環境光を有効に利用する光捕集アンテナ技術に着目し、プラズモン共鳴を利用する可能性について研究を行っている。プラズモン共鳴によって回折限界を超えた集光が可能になることで、特に光誘起多電子移動を伴う光－物質変換が高効率化される可能性を追求している。このような光機能性電極においては、光捕集アンテナ構造の設計に加えて、電子移動やエネルギー移動などの様々な特性に大きな影響を与える電極界面構造の最適化が不可欠である。本研究では、原子・分子レベルで構造規制された金属－有機界面において、光捕集アンテナ構造を構築する技術を確立し、さらに、エネルギー変換過程におけるプラズモン効果、電極－分子間の電荷移動、光エネルギー変換の各要素に対して、理論と実験の両面から検証を加えることで、界面構造が電子移動速度に与える影響を明らかにするなど、高い評価を受けている。

伊藤 衡平研究者：

高効率な高圧水電解プロセスの実現を目指している。高圧水電解では水素ガスクロスオーバー、これによる電流効率の低下が問題となる。このクロスオーバーの抑制にはカソード多

孔質体上の水素ガス気泡の挙動が重要だと着眼し、対流効果によるクロスオーバの抑制に挑戦した。カソードに水を供給することで対流効果を与え、多孔質体上の水素ガス気泡の離脱を促進し、クロスオーバを抑制することで最大で 5% の電流効率の向上を達成した。さらに、「その場観察」にも取り組み、対流効果が及ぼす水素ガスの離脱気泡径、周波数の変化を見出し、気泡力学モデルに基づいた解析とあわせて対流効果によるクロスオーバ抑制メカニズムを示すという成果をあげた。

喜多 浩之研究者：

SiC/MOSFET のエネルギー効率向上のため、その抵抗損失を引き起こす MOS 界面近傍の界面欠陥の削減を目指す研究である。本研究では、SiC 酸化反応の熱力学と速度論に基づいて温度・酸素分圧を選択することにより、界面欠陥をもたらす主要因となる炭素由来の副生成物の影響を低減させることを試み、その結果、SiC の価電子帯から 0.1-0.4eV のエネルギー領域において界面準位密度 $<10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ という、低欠陥密度の界面を実現した。これは世界で初めて他元素による界面修飾を使わず、熱酸化プロセスだけで高品質な MOS 界面を SiC 上で実現したものである。

塩見 淳一郎研究者：

フォノンのシミュレーションと計測技術により、高性能な熱電変換材料の開発を目指す研究である。本研究では、精緻な計算と独自の理論を用いて、シミュレーションによる物性評価手段、予測に関する解析手法を確立し、ナノ構造化材料内のフォノンや電子の選択的な散乱・透過を利用することで、熱電変換効率の向上に資する開発手段を実現しており、今後は実際の材料スクリーニングに利用されることで大きな成果に繋がるものと考えられる。

柴田 直哉研究者：

原子分解能走査型透過電子顕微鏡 (STEM) をベースとして、サブ Å レベルに絞り込んだ電子線と試料との相互作用を高精度に計測する技術を開発することにより、原子レベルの電磁場分布を直接観察する手法を開発し、材料相界面制御型のエネルギー関連材料、デバイス研究開発に応用することを目指した。特筆すべき成果としては、要素技術として原子分解能対応多分割 STEM 検出器の開発に成功し、この多分割検出器を用いて原子電場の直接観察に世界で初めて成功した点があげられる。更に、この検出器の商用化にも成功し、2015 年秋から国内の大手電子顕微鏡メーカーから販売が開始されている。

関口 康爾研究者：

電気エネルギー使用量を激減させる「磁気トランジスタ」の構築のため、マグノン制御に適用できる基礎現象の発見・解明を目指す研究である。本研究により、ナノメートル級の厚さの導電性磁性体（パーマロイ合金：NiFe）を用いて、新たな構造の「三端子素子」を考案し、スピン波を演算素子に適用する鍵となるスピン波の重ね合せを初めて実現した。

さらに、この三端子素子を用いて、2つのスピン波を制御し、その波の重ね合わせの状態を観測したことは、磁気的な現象であるスピン波を用いて論理演算ができることを原理的に初めて実証したものであり、大きな成果である。

館山 佳尚研究者：

イオン伝導などのエネルギーに係る輸送機構を明らかにする計算手法を、緻密な分子動力学と第一原理計算から確立し、エネルギー高効率利用の具体的課題としてあげられる二次電池等の性能向上に資することを目指す研究である。その結果、微視的な反応メカニズムが不明であったリチウム二次電池の負極と電解液の界面に初期充電時に形成される界面被膜（SEI 膜）の生成過程を、理論的に明らかにしている。本研究では、京コンピュータを活用した大規模な第一原理化学反応計算手法を開発し、解析した結果、従来犠牲還元すると考えられていた添加剤が、実は溶媒のアニオンラジカルを不動態化する役割があること、そして SEI 膜の形成機構として従来想定されてきた表面成長機構だけでなく、沖合での凝集“near-shore aggregation mechanism”という新しい機構も主要な役割を果たすことを示した。これらの提案された新機構は、実験家にも十分受け入れられており、理論計算からの提案が具現化した一例となっている。

宮崎 晃平研究者：

リチウム空気二次電池の高性能化に関する研究である。リチウム空気電池は、エネルギー密度の高い金属負極と空気中の酸素をエネルギー媒体とするため、理論的には高い容量が見込まれるが、酸素ガスを利用する多孔質電極を空気極に使用するため、現状では充放電効率が低いという欠点がある。そこで、本研究では空気極の充放電効率を高めるために、各反応を律速する因子を抽出するためのモデル電極を作製し、解析が難しい多孔質電極内での電気化学反応の分布の観測に成功し、多孔質電極内の電解質液膜中のイオン輸送抵抗が、効率低下の主要因となっていることを明らかにした。

八代 圭司研究者：

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の更なる高性能化を目標に、その鍵となる電解質（イオン導電性酸化物）の新たな材料設計法を追及した研究である。電極触媒材料である遷移金属酸化物では、電極反応の駆動力となる酸素の化学ポテンシャルが、機械的な応力に依存して変化する Chemo-Mechanical な相関があることを実験的に明らかとし、また Maxwell の関係式から理論的な依存性を導出し、定量的に説明できることを示した。本結果を実用的に利用できれば、従来とは異なる新しい電極材料設計法となることに加え、学術的には、電気-化学-機械の融合した新しい学問分野となることが期待できる。

保田 諭研究者：

燃料電池電極の Pt 触媒と同等な、高活性な酸素還元能を持つ窒素ドーピンググラフェンの創

成に挑戦した研究である。本研究では、分子の規定構造性と自己集合能を利用することで、高酸素還元活性な触媒サイトの選択的合成に成功した。また、高効率な電子移動を有する活性サイト-カーボン界面を構築することで、酸素還元活性が向上することを示した。これらの結果は、発展途上であるが、種々の窒素-炭素構造の中で、四電子酸素還元活性の違いを見出したこと、触媒サイトへの高効率なカーボン界面を形成し、触媒活性を向上させたことなど、興味深い知見が得られており、今後の展開が期待される。

安田 琢磨研究者：

有機半導体デバイス物性の鍵となる分子レベル（1 nm）から実薄膜レベル（100 nm）間に介在するメゾスコピック階層領域における有機半導体分子の集積・配向を能動的に制御するアプローチに焦点を当て、エネルギー高効率利用に資する高性能・高効率な有機エレクトロニクスデバイスの開発を目指した。本研究では、特異的な分子間相互作用を介して精緻に分子集積・配列することにより、マイクロリボンおよびシート状構造体を形成する有機半導体材料を開発し、有機トランジスタへの適用を検討した結果、従来の有機半導体やアモルファスシリコンを凌ぐ高速電荷移動度を達成し、バンド伝導機構に基づく高性能有機半導体材料の設計指針を開拓した。また、有機太陽電池の高効率化においても、分子自己組織化を利用して、光電変換活性層中のメゾスケールの構造を制御する手法により、光電変換効率を飛躍的に向上できることを実証した。このように、液晶半導体独自の特異的挙動（自己組織能、ナノ相分離、界面形成）を能動的に活用して、有機トランジスタや有機太陽電池の高性能化および高効率化を達成した。

内田 健一研究者：

本研究者が発見した「スピンゼーベック効果」、「音響スピンプンプ効果」を発展させ、光エネルギーをスピン流に変換することを目指し、種々のエネルギー源をスピン波に変換した上で、社会に広く存在する未利用なエネルギーの有効活用を目指す研究である。本研究では、磁性絶縁体に埋め込んだ金微粒子中で表面プラズモン共鳴を励起することで、光エネルギーをスピン流に変換することに初めて成功するという大きな成果を出した。この変換は、これまでに確立されてきた熱・音波・電磁波によるスピン流生成現象と同様の材料において発現するため、スピン流や電流の駆動力として、同時に利用可能なエネルギー源の選択肢をさらに広げることができる。本研究成果は、表面プラズモンをスピン流素子に導入した初めての例であり、これまで独立して研究されてきたスピントロニクスとプラズモニクスを融合した、新しい研究領域の形成に繋がるものであるため、今後の大きな展開が期待される。

大久保 貴志研究者：

電子デバイスに殆ど利用されていない配位高分子を用いた電子デバイスや光電変換材料開発を目指す、という挑戦的な課題を設定し、様々な配位高分子を合成、薄膜化し、その

特性評価を行っている。その中で、3,5-ジメチルピペリジンジチオカルバミン酸を配位子とした、新規混合原子価配位高分子の合成に成功し、さらに、この配位高分子が比較的小さなバンドギャップを有する半導体であることを明らかにし、配位高分子が新たな無機・有機複合型半導体材料として展開できる可能性があることを示した。今後の研究分野の拡大、進展が期待される。

小林 厚志研究者：

太陽光と水から水素を創り出す人工光合成デバイスを、自己組織化反応により創出することを目指している。本研究では、La(III)イオンとRu(II)錯体配位子からなる新規多孔性配位高分子(PCP)を合成し、ナノ細孔内に取り込まれている水分子数に応じて、リン光波長とプロトン伝導性を制御できることを見出した。実用化に耐え得る太陽光エネルギー変換デバイスの創出には至っていないが、可視光増感分子からなるプロトン伝導性材料の創出や、ナノ粒子化による光増感効率の向上、水の光酸化および光還元反応の双方を駆動可能なナノ光触媒系の構築など、光水分解反応の高効率化に資する基盤的成果をあげており、今後の進展が期待される。

SANG Liwen 研究者：

In(インジウム)含量の大きなInGa_N(インジウム窒化ガリウム)薄膜を作成することで、赤外領域までを含む広い波長の太陽光を利用できる高効率な太陽電池の実現を目指している。本研究では、In組成を制御した窒化ガリウムインジウム(In_xGa_{1-x}N: 0.65-3.4eV)混晶を中心として、中間バンドを形成することで、バンドギャップエネルギーに相当する光のみでなく、それよりも長波長側、すなわち、太陽光の主要な構成波長である緑や黄色などの可視光を変換することに、低効率ながら成功している。本研究の成果は、複雑な構造となるタンデム構造を形成することなく、広い波長範囲の太陽光成分を利用できることを意味し、今後の研究により変換効率が向上できれば、太陽電池の効率向上に大きく寄与することが期待される。

竹中 壮研究者：

固体高分子形燃料電池(PEFC)の実用化に向けて、Pt触媒にシリカでの被覆により、その触媒活性を低下させることなく、耐久性を改善することを目指す研究である。Ptカソード触媒は酸性、高い正電位などの厳しい条件にさらされるため、Ptの溶解-再析出、およびPt粒子の凝集によりPt粒子径が成長し、触媒活性が低下する。本研究においては、厚さ数nmのシリカ層による被覆により、シリカ層を親水性から疎水性にすることで、Pt触媒の活性を低下させることなく耐久性を改善することに成功している。この知見は学術的にもそのメカニズムが興味深く、また、実用的にもPEFCのPt使用量削減に貢献できるものであり、今後の展開が期待される。

津島 将司研究者：

フロー電池に対する新規電極構造として「櫛歯流路構造」と「薄型多孔質炭素電極」を用いることを提案し、それを通じてフロー電池の高性能化を目指す研究である。「櫛歯構造流路」と「薄型多孔質炭素電極」により、セル抵抗を従来比 35%低減できることを実証した。さらに、エネルギー変換効率向上のメカニズムを計算科学的手法により明らかにし、フロー電池の高効率化のための学術基盤を構築した上でセル抵抗支配因子の定量的評価にもとづき、設計指針を提示することにも成功した。

戸谷 剛研究者：

金属膜表面の微細構造の設計・実現により、特定波長のみのふく射エネルギー放射を可能とする技術の実用化を目指す研究である。爆発性の溶剤を低温で乾燥させる技術として乾燥の分野で注目されている放射加熱式乾燥炉は、溶剤の吸収帯だけ放射を透過するフィルター部で大きな熱損失が発生していた。本研究では、溶剤の赤外線吸収帯だけを放射する赤外線ヒーターを開発すれば、ヒーターに投入する電力を削減できると考え、表面微細構造を用いて、溶剤の赤外線吸収帯にヒーターからの放射の波長を合わせる研究や、波長制御赤外線ヒーターによる入力電力削減効果の研究などを行った結果、従来のフィルター付きのヒーターに比べ、ヒーターへの入力電力を 40%削減できる可能性が示された。今後の研究の進展により、実用に寄与することが期待される。

富岡 克広研究者：

シリコン基板上のⅢ-V族半導体ナノワイヤのデバイスへの応用を目指し、電子機器の消費電力を 90 %以上削減できる、低消費電力・高性能型スイッチ素子の実現を目指す研究である。本研究では、ナノメートルスケールの半導体選択成長技術によって、Si/Ⅲ-Vヘテロ接合からなる新しい固相界面を形成し、この界面で生じるトンネル輸送を応用したトンネル FET で、理論限界の突破（サブスレッショルド係数の急峻化）を狙っている。半導体ナノワイヤヘテロ接合界面による変調ドープ構造と、Si/Ⅲ-V固相界面で、新しい切り口によってトンネル電流を増大する素子構造を提案し、これらの素子を作製することで、急峻なサブスレッショルド係数を維持したまま、電流値が大幅に増大されることを実現するという大きな成果につながった。今後の実用を目指した展開が期待される。

中山 将伸研究者：

計算科学の手法で、リチウムイオン電池の新しい電極材料（セラミックス）の提案、実現を目指す挑戦的な研究であり、本研究者はリチウムイオン電池正極材料の二相共存反応のメカニズムを実験・計算の両面から解析した。その結果、正極材料の均一相内のリチウムイオン拡散能を数桁凌駕しうる相界面イオン拡散の存在を指摘することができた。この知見は、車載電池のような高出力形電池の正極材料開発に資する有用な知見であり、今後の実験面からの展開が期待される。

二本柳 聡史研究者：

「埋もれた界面」の観察が可能な和周波数分光の手法を顕微化、高性能化することで、リチウム電池等の種々の材料表面（界面）の挙動を観察できる新たな手法の提供を目指す研究である。本研究では、分子レベルの薄さの界面領域を選択的に観測することができる振動和周波発生分光法と、サブミクロンスケールの空間分解能を有する近接場赤外顕微鏡を結合させ、新しい界面選択的非線形顕微分光計測法を開発した。しかしながら、本法により、モデル電池界面の測定データを詳細に解析した結果、既報の測定方法の解釈に問題があるという大きな課題を見出した。この課題を解決することは、非線形分光法の応用分野の拡大、およびそれを利用した実用相界面の観察に重要であることが明らかとなり、今後の展開が期待される。

増田 卓也研究者：

放射光施設の高輝度な硬 X 線を用い、リチウム電池等の電極反応を in situ 観察することが可能な X 線光電子分光法（XPS）測定システムの開発を目指した研究であったが、装置利用上の制約により、輝度・入射光エネルギーの劣る実験室規模の XPS 装置を土台とした測定システムの構築に注力した。本研究では、厚さ 10-15 nm の軽元素の超薄膜窓を有する環境セルを構築し、液体で満たしたセルを真空槽に保持、薄膜に X 線を照射することによって、薄膜（固体）と液体の界面より放出された光電子を（薄膜をとおして）真空側で検出するという配置で、世界で初めて、固液界面における電気化学反応の in situ XPS 測定を実現した。この原理に基づいて、水中で電位をかけることによって、シリコン表面に酸化膜が成長するという電気化学反応の in situ 観測に成功したほか、二次電池用電極反応を観察するための実験室型 in situ XPS 測定装置を開発しており、今後の大きな応用展開が期待される。

②科学技術の進歩への貢献

さきがけ研究者の、これまでの論文、口頭発表、特許の件数を下表に示す。

	論文			口頭発表			特許		
	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計
2011 年度 採択課題	17	133	150	156 (93)	146 (99)	302 (192)	7 (0)	2 (0)	9 (0)
2012 年度 採択課題	4	123	127	156 (69)	124 (53)	280 (122)	12 (2)	4 (3)	16 (5)
2013 年度 採択課題	4	42	46	87 (32)	64 (21)	151 (53)	9 (0)	2 (0)	11 (0)
研究領域 合計	25	298	323	399 (194)	334 (173)	733 (367)	28 (2)	8 (3)	36 (5)

（特許は出願数、口頭発表のカッコ内は招待講演数を内数で記入）

③科学技術イノベーションへの貢献

科学技術イノベーション、実社会への実装へとつなげることを意図し、企業との情報交換や共同研究を推奨している。32名のさきがけ研究者のうち、10名が研究課題に関連して企業と共同研究を実施しており、共同研究にまだ至っていないが、6名の研究者が企業との情報交換を実施している。

さきがけ研究での成果等は、今後さらに科学技術イノベーションに向けて進展することが期待されるため、研究成果を広く社会に知らせ、科学技術イノベーションに繋がることを期待して、プレス発表も勧めた。その結果、7研究者による10件のプレス発表を行うことができ、その結果、多くの企業等との情報交換に繋がっており、今後の共同研究、さらに社会への実装に繋がることが期待される。

④顕彰、受賞

さきがけ研究者32名のうち、内田研究者が12件の表彰を受賞し、また文部科学賞・若手科学者賞をあらたに6人（塩見研究者、安田研究者、関口研究者、中山研究者、内田研究者、富岡研究者）が受賞し、既に受賞していた津島研究者を加えて、合計では7人となっているなど、さきがけ研究の期間中に合計45件の表彰を受賞しているおり、優れた若手研究者が採択され、成長していることが示されている。一方、現時点でさきがけ研究課題に関連して受賞に至っていない研究者も14名おり、今後の活躍を期待したい。

⑤進捗が思わしくない事象、懸案事項

研究課題が提案当初の見通しどおりに進んでいない研究課題もあり、研究内容の見直しや研究期間の変更を行った。高圧水分解という次世代の水素社会を見据えたテーマで、性能向上のための一定の基礎データは得られたと評価しているが、水素を高圧で取り扱う実験装置の困難さから、2MPaレベルの運転圧力での現象、及びその物理的効果を特定、定量化のうえ、3年半での研究を終了した。また、金属膜表面の微細構造の設計・実現により、特定波長のみのふく射エネルギー放射を可能とする技術の実用化を目指す課題では、当初はヒートポンプ等の廃熱放出に適用する方針であったが、領域アドバイザーの指導等により、特殊・省エネ型ヒーターへと適用先を転換し、企業との連携のもと、有効な結果が出つつある。また、「埋もれた界面」の観察が可能な和周波数分光の手法を顕微化、高性能化することで、リチウム電池等の種々の材料表面（界面）の挙動を観察できる新たな手法の提供を目指す課題では、世界で初めての基本的な単分子層の測定までを可能にしたが、研究の過程で既報の手法の問題点を見出した結果、当初の研究プランが原理的に難しいことが明らかとなった。これは、研究姿勢としては評価できるものであり、本手法の有用性と適用限界を明確にしていくことを求めている。

⑥今後の期待や展望

毎月1回のさきがけ研究会をとおして、出口から後方を振り返り、ボトルネックが何処

にあるか、といった課題を抽出すること、さらにそれを説明しきることが、分野を問わず大切であることを改めて認識できたのではないかと考えている。この研究期間に 1 つ上のポジションに就いたさきがけ研究者も多いが、この課題抽出の大切さを忘れずにさらなる活躍、飛躍を期待するとともに、大きく成長してほしい。

(2) CREST

①研究総括の狙いに対する研究の状況

エネルギー利用の飛躍的な高効率化実現に向けて、ボトルネックとなる相界面現象の基礎学理を深化させ、そこで得られた知識を基に理想的な界面を設計し実証する、といったいわば出口から後方を振り返り課題を抽出することをとおして、例えば相界面におけるエネルギー損失の大幅削減を可能とするなど、新しい相界面機能の発現機構の発見や創造への糸口を得ることを目指した研究が、研究チーム内部あるいは他の研究チームと合同で、さらにさきがけ研究者などと融合しながら進められている。

以下に、中間評価を終えた 2011 年度及び 2012 年度採択の各研究チームの特筆すべき成果を記す。

川田チーム：

固体酸化物形燃料電池（SOFC）の技術の鍵となる電極の設計に、計測の視点からアプローチし、低温化が可能な電極の設計指針を追求する研究である。本研究では、電極内の反応場分布を世界で初めて直接測定し、従来の電極設計法の間違いを見出し、反応経路をデザインする新しい設計法を提案した。さらに、放射光による「その場」X線吸収測定にも成功し、これまで高温電極に使われてこなかった赤外分光や昇温脱離などの手法を含む、複数の測定手法を有効に活用するという、総合的な評価体制の構築に成功した。これにより、従来想像されていたものとは異なる高温電極反応場の「実像」（有効反応場長、構成材料同士の相互作用など）を明らかにし、拡散係数などの基礎データを精査し、従来広く行われてきた測定方法の問題点を明らかにするなど、高温電極の評価と設計に必要な基礎科学の構築に貢献している。今後の更なる展開に期待する。

古山チーム：

SOFC 高効率化に向けて、実験と対応した実時間・実空間スケールの解析が可能なシミュレーション手法を開発し、従来の手法では適用できなかった電極作製過程、雰囲気変化に伴う構造変化への適用、実験的検証の実現を目指している。本研究では、特に困難と予想していた燃料極焼成過程における微細構造形成を予測するシミュレーション手法開発に成功しており、構造制御による高性能化指針を獲得し、実用に向けて民間企業との共同研究も実施している。さらに実使用環境下の NiO の Ni 還元について、電極の微細構造変化シミュレーションも達成するなど、順調に成果を得ている。これらの成果により、従来は経

験的試行錯誤に大きく依存してきた多孔構造の合理的設計への道筋が拓かれ、SOFC や関連技術に使用される多孔質材料の高機能・高耐久化への貢献が期待される。

高田チーム：

沸騰・蒸発・凝縮および吸脱着現象を支配する「固気液相界面」に多面的にアプローチし、材料構造と輸送現象の関係をナノからマクロまで俯瞰する新たな学術「メタフルイデイクス」構築に取り組みながら、エネルギー問題に寄与することを目指している。本研究では、プール沸騰における限界熱流束を大きく向上させる伝熱面を創出し、新型デシカント用ナノ多孔体を設計・合成した。また、作動圧力領域におけるエタノール有効吸着量が既存の吸着材 (MaxsorbⅢ) の約 1.7 倍で、吸着式ヒートポンプシステムの理論性能が従来比約 1.5 倍となる高性能材料を開発するなど、工学的に幅広い応用が見込まれ、社会・経済への貢献可能性の大きな成果が得られており、今後の実用に向けての展開が期待される。

高柳チーム：

収差補正型超高分解能電子顕微鏡 (Ro05) による“その場”観察を駆使して、ナノワイヤ型のリチウム二次電池正極材料であるマンガン酸リチウムの挙動を解明し、種々の応用へ展開することを目指した。本研究により、ナノワイヤ型電池では高速充放電によっても電極破壊や容量減少が無いことが見出された。ナノワイヤ電極 ($\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ 直径 200 nm、長さ 200 μm 程) 内に、ワイヤ軸に沿って「高濃度相・中間相・低濃度相」相界面構造が生成され、これが充放電サイクル時のリチウムイオン濃度変化を可逆的に引き起こす原因であることを明らかにした。この成果は、今後のリチウム電池用材料開発に大きく寄与することが期待される。

陳チーム：

電気自動車等に需要が高い次世代革新型リチウム 2 次電池の開発を目指し、リチウムイオン電池の 5~8 倍の理論性能値を持ち、かつ、空気を燃料とするリチウム空気電池の開発を目的としている。本研究の特筆すべき成果として、リチウム空気電池および水電解による水素製造のための 3 次元ナノポーラスグラフェン電極の開発があげられる。一繋ぎりの 3 次元ナノポーラス構造を持ちながら、グラフェンの大きい比表面積と高い電気伝導性を効果的に維持することができ、これにより長年技術的な課題だった、グラフェンの 3 次元構造を有した電極としての効果的な利用を可能にした。一方で、化学的にドーピングおよび担持された RuO_2 触媒により、触媒活性のないグラフェンの触媒機能が劇的に改善されることも示した。3 次元ナノポーラス窒素ドーピンググラフェンと RuO_2 複合材は再充電可能な大きい容量を持つと共に、高いエネルギー効率と長サイクル寿命を示すことも明らかとなった。さらに化学ドーピングナノポーラスグラフェンの利用により、水電解による高効率な水素発生が可能なることも示した。これらの成果が進展し、実用に繋がることを期待される。

安部チーム：

目標は高容量・高出力を両立するリチウム二次電池の、合剤電極設計指針を提示することである。現行の電気自動車用途のリチウムイオン電池は、電極を低密度にすることで短時間充電を可能にしているが、これはエネルギー密度を犠牲にしている。すでにリチウム二次電池の構成材料である活物質、電解液、セパレータは最適化されており、電気自動車用途で材料自身のポテンシャルを発揮できない要因は、合剤内イオン輸送が高密度では低下するためであり、その解明を目指している。この現象は広く認識されていたが、合剤内イオン伝導を実際に調べた研究はない。本研究では、合剤電極の細孔をモデル化した陽極酸化ナノポーラスアルミナ膜を用いて、細孔内のイオン輸送挙動を調べた。その結果、細孔内でのイオン輸送がバルク電解液と比べて一桁以上低下する現象を見出している。本研究の成果を発展させることにより、実用電池の設計に大きく寄与することが期待される。

宮武チーム：

アルカリ形燃料電池の高性能化と高耐久化を実現することを目的として、独自の分子設計に基づく新型アニオン導電性電解質膜と高性能な卑金属触媒の開発を目指す研究である。本研究ではアニオン導電性高分子の分子構造(疎水部、親水部)を独自の手法で設計、合成することで、従来の電解質膜に比べて著しく高いアニオン導電率を達成し、さらに加速劣化試験による劣化機構の解析から、より安定な分子構造へ展開しヒドラジンやアルカリに対する安定性を改善したアニオン導電性高分子の開発に成功している。このアニオン導電性電解質膜は、他の用途への応用展開も広がってきており、エネルギー高効率利用に貢献しうる革新的技術として、産学協同での推進体制が進んでおり、大きな成果が期待される。

山下チーム：

相界面光誘起過程を理論・計算科学の観点から解明することを目指す研究である。本研究では、エキシトンの解離により生成したキャリアを有効に取り出すことが、有機系太陽電池、水分解光触媒反応におけるエネルギー変換技術としての要となると考え、そこでキャリアの熱的緩和寿命を予測する、電子-フォノン相互作用を取り込んだ多体摂動論による新規な計算方法を開発した。その結果、エキシトン解離過程では緩和 CT 状態からの自由電荷生成(cool process)に加え、非緩和 CT 状態からキャリアが緩和せずに超高速に自由電荷生成する過程(hot process)を検証し、高効率エネルギー変換には hot process を生起する材料設計をすれば良い、という新たな知見が明らかとなった。本知見のさらなる進展による大きな成果の実現が期待される。

②科学技術の進歩への貢献

CREST 研究チームの、これまでの論文、口頭発表、特許の件数を下表に示す。

	論文			口頭発表			特許		
	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計
2011 年度 採択課題	4	204	208	285 (64)	228 (102)	513	9	4	13
2012 年度 採択課題	7	128	135	260 (72)	130 (64)	390	6	2	8
2013 年度 採択課題	7	64	71	137 (40)	119 (60)	256	20	3	23
研究領域 合計	18	396	414	682 (176)	477 (226)	1,159	35	9	44

(特許は出願数、口頭発表のカッコ内は招待講演数を内数で記入)

③科学技術イノベーションへの貢献

さきがけと同様に、企業との情報交換や共同研究を推奨している。出口から見据えたテーマ設定を重視しており、企業に在籍する領域アドバイザーとの議論を設定するとともに、研究総括や領域アドバイザーから企業研究者を紹介し、連携につながった例もある。

チーム内のグループとして企業が加わっているチームとしては、小林チームと宮武チームの 2 チームがあるが、チーム内にとどまらず企業との連携を進めている。例えば、小林チームでは太陽電池メーカーと連携し、宮武チームでは、企業と共同でアニオン導電性高分子の大量合成、製膜、補強等の技術の開発、評価を行っている。また、高田チームからは、国家課題対応型研究開発推進事業原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブのプロジェクトが立ち上がっており、ハニカム多孔質体を用いて、大型加圧水型軽水炉（PWR）へ適用できる技術開発を目指し、企業との連携している。

また、さきがけ研究課題終了報告会としての公開シンポジウムを 2014 年度より実施しているが、2015 年度には陳チーム、足立チームによる企業等出口側の研究者に向けた講演も予定しており、研究成果を社会に還元するよう意識している。

④顕彰、受賞

CREST の研究代表者の主な受賞としては、古山研究代表者の文部科学省若手科学者賞の受賞、および宮武研究代表者のドイツ・イノベーション・アワード「ゴットフリード・ワグネル賞」秀賞受賞があげられる。CREST においては研究代表者のみならず、研究チーム内の若手研究者の学会賞の受賞が目立っており、若手研究者の今後のキャリア形成にも寄与しているものと考えられる。

⑤今後の期待や展望

CREST には、1 つの研究ユニットとしてその研究分野のトップランナーとなることを期待

している。一方で、エネルギー高効率利用を実現するためには、CREST 研究により明らかとなった相界面現象や相界面科学をとおして、量的にどれほど貢献できるかを明確にする必要があるいは、それを見とおして課題設定を行う必要がある。CREST 研究代表者には、多くの研究論文成果、および若手研究者の育成を期待するとともに、その研究が果たす量的貢献を最大にするためのリーダーシップを大いに発揮していただきたい。

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメントについて

本研究領域では、戦略目標を達成するため、材料系、化学系、機械系、電気系、システム系、物理系、数理系など幅広い分野から、将来性のある研究者をさきがけメンバーとして、またそのような研究者が参画する研究チームを CREST 研究チームとして採択した。勢いのあるさきがけ研究者と、力のある CREST 研究チームを採択できたと考えている。さきがけ研究者は、毎月 1 回の研究会をとおして、目標を達成するためのボトルネックは何か、を問われ続けたことや、領域アドバイザーによるマンツーマンの指導により、採択時に少々曖昧であった研究課題を極めて明確なものとし、またこの研究期間中に研究者の多くが 1 つ上のポジションに就くなど、研究者としての成長が著しい。さらに毎年 1 回の CREST・さきがけ合同領域会議をとおして、粗削りでも勢いのあるさきがけ研究者と、その研究分野の先端を走る CREST 研究者との交流が、お互いに刺激し合うことはもちろんのこと、本研究領域初年度から研究者の相互乗り入れや共同研究への展開につながっている。今後も、さらなる融合研究の拡大を期待したい。

(2) 研究領域としての研究成果の見通し

個々の研究課題については、その研究成果や達成度に大きな差があることを認めざるを得ない。特にさきがけ研究者については、自身が提案した研究課題について、実験装置や計算コードがすでに用意できている場合には、論文発表や国際会議での口頭発表など実績をあげているが、その場計測などの測定手法を提案した場合には、装置作りに時間を要し、ようやく信号をキャッチできた段階で、装置を用いて実績が積まれるのはこれからとなるケースもある。その方向性については間違いがなく、今後の進展が期待される。また、領域アドバイザーとのマンツーマンの指導により、当初の課題についての研究方針を見直したもののについても、今後の展開が期待される。

CREST 研究においても、エネルギー高効率利用に向け、その課題解決に着実に実績をあげている研究チーム、ようやくここに来て研究成果が出始め、全体像が描けるようになってきた研究チームなど、その達成度に大きな差が認められる。さらに中間評価をとおして課題設定の見直しを要する研究チームについては、改めて提出される課題設定を精査し、研究資金配分及び研究体制の見直しを実施することで、研究目標の達成に向けた指導を行う。

エネルギー高効率利用を具現化するには、得られた研究成果を社会実装した際に、量的

貢献が大きいことが必須条件となるが、これは一般的には容易なことではない。しかしながら、本研究領域において、各さがけ研究者や CREST 研究チームに問い続けている、出口から後方を振り返り課題を抽出するアプローチが機能している限り、戦略目標を達成できるものと考えている。

本研究領域としては、本資料中の 1 ページの達成目標の記述や 7 ページの図に示されるように、相界面における

- (i) エネルギー変換・輸送機構の解明
- (ii) マルチスケール解析シミュレーション・設計手法の開発
- (iii) 最適な構造制御への数理科学的手法の創出
- (iv) 高機能化による理論的最高性能の実現

の 4 つの達成目標を掲げている。各さがけ研究者や各 CREST 研究チームは、出口を見据えつつ、研究課題の相界面現象を明らかにすることに挑戦しており、いわゆるサイエンスとして、これらの目標への達成度はすでに高い位置にある、あるいは高い位置に達することが十分期待される。一方、エンジニアリングとして何がボトルネックであるかを見極めつつ研究を進めてはいるものの、研究室レベルの話に終始する限り、実際に社会実装される状況が必ずしも描けていないことになる。さがけ研究者や CREST 研究チーム、あるいは提案された研究課題にもよるが、社会実装（実社会への普及）をより強く意識した取り組み（企業との共同研究の開拓など）を今後 3 年間強化することで、エンジニアリングを含めた 4 つの目標を達成したい。

(3) 本研究領域を設定したことの意義

エネルギー技術に対しては、経済産業省を中心に多くの国家プロジェクトが実施され、現在も精力的に推進されている。これらのプロジェクトでは実用化への貢献が第一に問われているため、直接の貢献が見えにくい基礎研究への配慮は、その重要性が認識されつつも、必ずしも十分ではない。一方、エネルギー変換、エネルギー輸送、エネルギー貯蔵に関する基礎研究は、科学研究費補助金を中心に推進されている場合が多いが、必ずしも実用化につながるものとはなっていない。エネルギー問題は特定の画期的なブレークスルー技術だけで全てが解決するような性格のものではなく、エネルギーに関わる様々な分野の技術による総合戦略を持って解決すべきものと位置付けられており、省エネ・高効率化・再生可能エネルギーなどあらゆる技術を俯瞰し、その貢献度や普及時期を見据えて研究開発を進める必要がある。

本研究領域で取りあげているように、エネルギー機器やエネルギーシステムにおいて、相界面での力学的、化学的、あるいは電磁気学的な現象は、その機能や効率を支配する共通の本質的な素過程となっていることから、様々な分野における相界面現象を解明し、設計するための基礎研究こそ、エネルギーに関わる目的基礎研究そのものといっても過言ではない。よって、相界面科学の高度化、すなわちその素過程の現象解明、およびその不可逆損失を最小化するための設計（最適化、制御）科学を、出口を見据えて課題を抽出、あ

るいは出口から振り返り課題を抽出しつつ推進することが重要であり、その意味で本研究領域設置の意義は大きい。

なお、相界面現象や相界面科学はエネルギー利用に限らず、他分野にも広く転用できる共通基盤的なものであり、その波及効果は目に見えない領域にまで及ぶものと期待される。

(4) 今後への期待や展望

本研究領域ではここで記述されたように、材料系、化学系、機械系、電気系、システム系、物理系、数理系など多くの分野に関連する相界面現象の解明をとおして不可逆損失を最小限に抑えることで、エネルギーを高効率に利用することを目指す研究が推進されており、すでに世界的にも高レベルの研究成果が多く得られつつある。また、領域アドバイザーの個別相談や仲介による企業との連携や、国際共同研究への展開などを含む領域マネジメントにより、今後、戦略目標を達成するための多くの研究成果が、CREST・さきがけの両研究領域から生み出されることが期待される。その成果が、日本国内のみならず、地球規模に関わるエネルギー利用の高効率化に、量的にも貢献できることを期待したい。

(5) 感想、その他

最近では周辺の研究進捗度、研究状況変化の速さが顕著で、研究期間の3年や5年の間に状況が一変することもあり得る。この場合、一旦研究題目を提案すると、この研究期間中には変更できないので、申請する側も審査する側も、特定のキーワード（流行のキーワード）が含まれる研究題目には注意を要すると思う。広義に解釈できる研究題目にすることが、題目を研究期間中に変更できない制約を鑑みると、運用上は好ましいのかもしれない。