

平成 23 年度戦略目標

1. 戦略目標名

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

2. 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

3. 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。

- ・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
- ・化学界面：化学反応界面、電気化学界面、光化学界面など
- ・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、以下に挙げた技術分野のほか、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。

○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／固体相界面のマイ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。

○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。

○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。

○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。

○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。

○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。

4. 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。

【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

【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

【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

マイクロ、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、数理学

5. 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（平成 22 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挙げられている。

「科学技術に関する基本政策について」に対する答申（平成 22 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」（平成 22 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。

6. 他の関連施策との連携および役割分担・政策効果の違い

独立行政法人新エネルギー・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されることが期待される。具体的には、固体酸化物型燃料電池（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型燃料電池（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、平成 21 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」が挙げられるが、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。

7. 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」（平成 21 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・イニシアティブの下、「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（平成 22 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。

8. 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。