

報 告

## 応用物理の将来ビジョン



平成20年(2008年)7月24日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会 未来社会と応用物理分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会未来社会と応用物理分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会 未来社会と応用物理分科会

委員長	小舘 香椎子 (第三部会員)	日本女子大学教授
副委員長	荒川 泰彦 (連携会員)	東京大学教授
幹事	財満 鎮明 (連携会員)	名古屋大学教授
幹事	吉野 淳二 (連携会員)	東京工業大学教授
	桑野 園子 (第一部会員)	大阪大学教授
	後藤 俊夫 (第三部会員)	中部大学副学長
	神 裕之 (第三部会員)	豊田工業大学副学長
	石原 宏 (連携会員)	東京工業大学教授
	市川 昌和 (連携会員)	東京大学教授
	一村 信吾 (連携会員)	(独)産業技術総合研究所研究部門長
	尾浦 憲治郎 (連携会員)	大阪大学特任教授
	大津 元一 (連携会員)	東京大学教授
	大野 英男 (連携会員)	東北大学教授
	奥村 次徳 (連携会員)	首都大学東京教授
	尾鍋 研太郎 (連携会員)	東京大学教授
	木村 忠正 (連携会員)	電気通信大学教授
	小長井 誠 (連携会員)	東京工業大学教授
	白木 靖寛 (連携会員)	武蔵工業大学教授
	竹内 淳 (連携会員)	早稲田大学教授
	田島 道夫 (連携会員)	宇宙航空研究開発機構教授
	多田 邦雄 (連携会員)	金沢工業大学教授
	橘 邦英 (連携会員)	京都大学教授
	遠山 嘉一 (連携会員)	日本女子大学客員教授
	波多野 睦子 (連携会員)	(株)日立製作所主管研究員
	真壁 利明 (連携会員)	慶應義塾大学教授
	松尾 由賀利 (連携会員)	(独)理化学研究所主任研究員
	三間 罔興 (連携会員)	大阪大学教授
	矢口 博久 (連携会員)	千葉大学教授
	谷田貝 豊彦 (連携会員)	宇都宮大学教授
	渡辺 美代子 (連携会員)	(株)東芝グループ長

# 要 旨

## 1 作成の背景と目的

応用物理は、物理や化学など基礎科学に立脚して学術分野として発展するとともに、多くの工学的価値を創造し産業技術の進歩に貢献してきた。応用物理が、今後学術分野としてさらに発展し、安全・安心で環境に優しい社会の創出に資するためには、中長期の展望・ビジョンを掲げ、新たな課題に立ち向かうことが求められる。

本分科会は、これまで、応用物理の研究分野の今後の展開について検討し、将来ビジョンとして未来社会へ向けた強化策と新たな融合分野の創成について広く議論を進めてきた。また、応用物理の発展に向けた産学連携の在り方を議論するとともに、次世代を担う人材の育成・教育について検討を行ってきた。

本報告は、応用物理の将来ビジョンについて、分科会におけるこれまでの検討結果をまとめたものであり、3つの主要項目から構成される。

- ・ 応用物理研究分野の将来ビジョン
- ・ 応用物理関連分野における産学連携の将来ビジョン
- ・ 応用物理関連分野における人材育成の将来ビジョン

## 2 報告の内容

### (1) 応用物理研究分野の将来ビジョン

応用物理の今後の発展に向けて、関連分野の連携・融合による研究開発強化と新たな学術分野創成が重要である。このためには未来社会を描きながら応用物理およびその関連分野について将来ビジョンを明らかにし、今後の研究分野の方向性を示すことが求められる。

まず、応用物理学会における将来ビジョン・ロードマップの策定の経緯およびその内容について論じた。次に応用物理が環境エネルギーの課題の解決の担い手となるという観点から、融合的将来ビジョンとして環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)を示した。さらに、応用物理の今後の発展に向けて、エマージング技術・分野の重要性について論じた。

### (2) 応用物理関連分野における産学連携の将来ビジョン

経済成長へのシーズとなる科学技術分野のイノベーション創出に対する期待は、益々高まっている。しかしながら、日本の人口減少と高齢化はこ

の先 20 年間に急速に進み、生産労働人口が半減することが予想されている。

一方、近年の中国やインドに代表されるアジア圏の経済成長によって、世界の経済・産業状況は大きく変わろうとしている。これらの国々の豊富な労働力と先進国からの技術導入スピードの加速に対して、技術革新による新しい価値の創造と新しい市場の開拓による競争力強化が不可欠になる。

産学連携は、イノベーションを創出するための重要な契機となり、また将来の技術開発を支える人材を育成するための有効な舞台としても機能する。産業界の技術者との共同研究による実践力の涵養に加え、博士課程進学者の増加や若手研究者のキャリアパスを拓く上でも有効に活用することが必要である。本章では、産学連携を円滑に進めかつ強化していくための方策とともに、産学連携を活用した人材育成のあり方について述べた。

### (3) 応用物理関連分野における人材育成の将来ビジョン

我が国が最先端の科学・技術において世界をリードするためには、理工系人材の絶対的な人員の確保、その基礎学力の向上に加えて、革新的進歩を担う「トップレベルの人材」の育成を推進することが必須であり、そのためには以下の対策が重要と考えられる。

科学技術の発展を支える人材の量的な確保のためには、将来の産業構造と人口動向を勘案した人材育成計画の策定とその計画に基づく教育体制の整備、初等中等教育の理科教育の充実のため教育学系学部出身者の物理好きを増加させるための対策、高校の物理の必修化、国民全体の科学・技術リテラシーの向上のための対策、海外の人材が我が国で長期的にポストを維持する上での障壁の低減による海外の優秀な人材の我が国への定着促進等の対策が必要と考えられる。

高度な最先端科学・技術の研究開発に従事する理工系人材の基礎学力の向上のためには、まず、産官学の連携による高等教育修了者に求められる基礎学力の精査とそれに基づく高等教育カリキュラムの策定が必要である。初等中等教育カリキュラムは、高等教育カリキュラムを基準として策定されるべきものである。同時に、高等教育修了者に対する卒業要件の厳格化が求められる。また、優れた資質を備えた学生を讃え、処遇する等、その能力を伸ばす体制の整備、優れた学生が抵抗無く博士課程に進学出来る経済的支援体制の整備も必要と考えられる。

トップレベルの人材の育成には、優れた素質を有する学生を博士課程に導き、その教育を通じてその能力を開花させる必要がある。そのためには、科学研究設備のさらなる充実、大学教員の雑務を低減し教育研究に専念できる環境を整備することに加えて、博士課程修了者やポストドクターのキャリアパスの整備が不可欠である。キャリアパスを充実したものとするためには、産官学の連携と人材交流の活性化により大学院博士課程において

企画力、評価力、マネジメント力を養う教育を実現し、博士課程修了者が、従来のアカデミックポストのみならず官僚や産業界のリーダーとして科学技術政策や企業戦略の立案に関わる道を拓くことが必要である。また、工学系学位の所有者の理科教員免許取得のための障壁の低減は、キャリアパスの整備という観点で重要であると同時に我が国の初等中等教育の理科教育の強化に必須と考えられる。

## 目 次

1	はじめに	1
2	応用物理研究分野の将来ビジョン	1
	(1) 将来ビジョン・ロードマップの策定の経緯と内容	1
	(2) 環境・エネルギーイノベーションロードマップ	2
	① 環境・エネルギーイノベーションロードマップの意義 ～応用 物理の発展にとって環境・エネルギーの課題解決が鍵になる～	2
	② 環境・エネルギーイノベーションロードマップの目指す方向	3
	③ 環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)の内容	4
	④ 応用物理におけるエマージング技術・分野への期待	6
3	応用物理関連分野における産学連携の将来ビジョン	7
	(1) イノベーションの創出と産学連携強化の必要性	7
	(2) 産学連携研究開発の課題	8
	① 多様な連携モデルや各々の連携フェーズに対応できる コーディネータの育成	8
	② 長期戦略に基づいた省庁連携型ファンディングの充実	9
	(3) 産学連携人材育成の強化	9
	① 研究インターンシップの活用による大学院学生と若手研究者の育成	9
	② 高等専門教育の実質化と産学連携	9
4	応用物理関連分野における人材育成の将来ビジョン	10
	(1) 人材の量的確保	11
	① 将来の産業構造を勘案した人材の必要数の将来計画の策定と 教育・社会体制への反映	11
	② 初等中等教育の理科教育体制の整備	11
	③ 産業界における科学者・技術者の地位と処遇の向上	12
	(2) 人材の質的な確保	12
	① 高等教育修了者の基礎学力の向上	12
	② 高い将来性を有する学生の優遇・支援	13
	③ 高等教育機関への海外からの優秀な人材の採用	13
	(3) 博士課程修了者に対する出口の確保	13
	① 産学官人材流動化と博士修了者のキャリアパスの整備	14
	② 博士課程に関する意識改革と修了者に対する処遇の改善	14
5	おわりに	15
<参考資料>		
	総合工学委員会未来社会と応用物理分科会審議経過	16

<付録 1>

応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書……………17

<付録 2>

環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)……………18

## 1 はじめに

応用物理は、物理や化学など基礎科学に立脚して学術分野として発展し、また多くの工学的価値を創造し産業技術の進歩に貢献してきた。応用物理が、今後学術分野としてさらに発展するとともに、安全・安心で環境に優しい社会の創成に資するためには、中長期の展望・ビジョンを掲げ、新たな課題に立ち向かうことが求められる。

本分科会は、これまで、応用物理の研究分野の今後の展開について検討し、将来ビジョンとして未来社会へ向けた強化策と新たな融合分野の創成について広く議論を進めてきた。また、応用物理の発展に向けた産学連携の在り方を議論するとともに、次世代を担う人材の育成について検討を行ってきた。

本報告は、応用物理における将来ビジョンについて、分科会におけるこれまでの議論をまとめたものであり、3つの主要項目から構成される。

- ・ 応用物理研究分野の将来ビジョン
- ・ 応用物理関連分野における産学連携の将来ビジョン
- ・ 応用物理関連分野における人材育成の将来ビジョン

## 2 応用物理研究分野の将来ビジョン

応用物理の今後の学術的発展に向けて、関連分野の連携・融合による研究開発強化と新たな分野創成が重要である。このためには未来社会を描きながら応用物理およびその関連分野について将来ビジョンを明らかにし、今後の研究分野の方向性を示すことが求められる。応用物理学会では、2年にわたり将来ビジョン・ロードマップの策定に取り組み、応用物理の今後の果たすべき役割や位置づけを明らかにしてきた。本分科会も、応用物理学会のこの取り組みに対してさまざまな形で協力・支援を行ってきた。本章では、まず、応用物理学会の将来ビジョン・ロードマップの策定の経緯を述べた。次に、応用物理が環境エネルギーの課題の解決の担い手となるという観点から、融合的将来ビジョンとして環境・エネルギーイノベーションロードマップについて検討し、その試案を示す。さらに、応用物理として、エマージング技術・分野の重要性について述べる。

### (1) 将来ビジョン・ロードマップの策定の経緯と内容

応用物理学会では、物理科学、材料科学からデバイスに至るまで広範囲の学術研究・技術開発を行うとともに、関連する研究者・学生の教育・養成の活動を行っている。応用物理学会の発展の鍵は、各分野の学術研究の

自発的深化、経済競争力を持つ技術創成にむけた新研究領域・融合分野の開拓及び人材育成にある。この観点に立ち、2006年10月に将来計画委員会の中に将来ビジョン検討WGを設置した。同WGでは、応用物理の将来ビジョンを議論し、将来ビジョン・ロードマップ作成という具体的作業を通じて、応用物理の今後の果たすべき役割や位置づけを明らかにしてきた。

応用物理の研究者は、自分の創意に基づき自らのビジョン・哲学に立脚して活動を行っている。しかし、応用物理の研究として社会的価値を高めるためには、研究者がそれぞれのビジョンを持ち寄り、時間軸を含む空間の中で俯瞰することも重要である。将来ビジョン・ロードマップの意義は、研究者及び関係者が時間軸を有するビジョンを共有することにある。これにより、新しい学術的価値の創成や、新規分野および融合分野の開拓や学術に立脚したイノベーションが創出される。

将来ビジョン・ロードマップの作成に際し、多岐多様な応用物理分野を如何なる切り口で整理しマップとして構成するののかという点が大きなポイントであった。今回はボトムアップを基本とした分類にもとづいて作成することとした。

具体的には、19の「要素技術クラスター」を設け、それぞれのクラスターで専門家が結集し将来ビジョン・ロードマップの策定を行った。19のクラスターは、①シリコン、②有機・分子、③テラヘルツ、④量子情報・物理、⑤フォトニクス、⑥オプティクス、⑦X線・深紫外計測技術、⑧ワイドバンドギャップ、⑨結晶成長、⑩プロセス技術、⑪磁性スピントロニクス、⑫バイオエレクトロニクス、⑬医療エレクトロニクス、⑭マイクロ・ナノメカニクス、⑮ナノ構造技術、⑯超伝導技術、⑰環境・エネルギー技術、⑱人材育成、⑲食糧技術である。それぞれの要素技術クラスターは、2040年をゴールにした時間軸のもとで将来ビジョン・ロードマップを作成した。詳細は付録1を参照されたい。

## (2) 環境・エネルギーイノベーションロードマップ

### ① 環境・エネルギーイノベーションロードマップの意義

～応用物理の発展にとって環境・エネルギーの課題解決が鍵になる～

持続可能社会を実現し、世界の人々が将来にわたって豊かな生活を送ることは人類共通の目標であり、エネルギーの確保、環境保全、経済成長を同時達成することは極めて重要な課題である。この困難な課題を解決するには、自然科学、社会科学、人文科学などの異分野の知の融合と活用、およびグローバルな連携、による環境・エネルギーイノベーションの創出が必要である(付録2「資料1」)。第3次科学技術政策では、重点4分野を含む8推進分野にわたって戦略重点科学技術を挙げている

が、そのうち4割を超える科学技術が環境・エネルギー関連であり、当分野の研究開発の社会的要請は大きい。戦略的に画期的な技術開発を推進して世界的な規模の課題を解決するには、研究者及び関係者がビジョンを共有することが重要となる。そこで応用物理将来ビジョン・ロードマップの19クラスターから環境・エネルギーに関する技術を抽出して、融合的将来ビジョンとして環境・エネルギーイノベーションロードマップについて検討を行った。従来の個別的な技術成果の積み上げでは、地球規模の課題克服には不十分であり、「持続可能性」の実現に確実に貢献しうるプログラムづくりと、それに沿った研究開発への期待が大きい。そのためには、温暖化と資源枯渇の時間軸を入れた定量的な予測を行い、そこからの脱却を図りうるイノベーションシナリオを描くことが重要である。

## ② 環境・エネルギーイノベーションロードマップの目指す方向

環境の専門家が描く脱温暖化のシナリオによれば、CO<sub>2</sub>排出量を少なくとも2050年までに半減、今世紀中には1/4に大幅削減する必要がある。一人当たりの排出量が多い先進各国は、増加分の大半を排出してきた経緯もあり、より多くの削減幅で目標の達成を前倒しする責任がある。しかし世界全体の温暖化ガス放出量や、エネルギー・希少資源の消費量は増え続けており、京都議定書の目標達成も危ぶまれている。CO<sub>2</sub>排出量の顕著な削減には、エネルギーの消費と供給の両面に亘って、画期的な施策が不可欠である。特に消費面では、本格的なネットワークIT社会の到来により、インターネットを流れる情報量が現在の200倍以上に増大(情報爆発)する。このネットワークを構成する各IT機器の台数増加、情報処理量の増大に伴う電力消費量の急増がもたらすCO<sub>2</sub>排出量は、地球温暖化問題解決の観点から決して無視できない量に達しつつある。具体的には、情報通信量は年50%の割合で増加すると仮定すると、2025年には年間の電力使用量が現在の1,000倍になる。またインターネット上のトラフィック量が毎年40%増加し、2015年にはルーターの占める電力が日本全体の消費電力の9%を占めることになる。IT機器による電力消費量の増大は米国でも問題視され、産官民の本格的取り組みが始まりつつある状況であり、日本においても、技術革新による抜本的な対策が必須である。

一方、石油は今世紀中に枯渇し、石炭も22世紀には枯渇する見通しである。長期的に世界的なエネルギー供給の流れは、化石エネルギーから再生可能エネルギーへ、炭素社会から水素社会へ向かっている。なかでも持続可能エネルギーの獲得には、太陽、風力、バイオマスなどの再生可能な自然エネルギー技術の開発と、その大規模な利用が必須である。

しかし、風力や太陽光発電に代表される自然エネルギーは出力変動が大きく、発電電力の貯蔵に課題がある。特に太陽光発電の世界的普及には、太陽電池や太陽光発電システムにおける革新的な技術導入により、発電コストの低減を促進する必要がある。

このような状況に対し、従来の個別的な革新に加え、「世界全体の持続可能性」に貢献するマクロかつ定量的視点を重視し、融合的将来ビジョンとして、環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)を作成した(付録2)。いうまでもなく、このイノベーションロードマップは、応用物理学会の環境・エネルギーに関する将来ビジョン・ロードマップと一部は重複している。なお、本マップについては、今後1年以内に関係方面と議論を進め、最終案を定める予定である。

### ③ 環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)の内容(付録2)

取り組むべき範囲が極めて広いため、ア.持続可能・脱温暖化、イ.エネルギー生成、送電、蓄電、ウ.省エネルギー・高効率化、エ.環境モニタ、オ.地球環境予測、カ.環境負荷低減資源・代替、キ.低負荷・環境調和製造、の7つの分野に分類し2040年までの技術ロードマップを作成した(付録2の「資料2、3」)。なお時間軸は、実用化フェーズの目標時期に相当する。さらにイノベーションロードマップに加え、応用物理が拓く環境・エネルギーイノベーションの全体像を描いた(付録2「資料4」)。

各分野の要点を以下に示す。

#### ア 持続可能・脱温暖化

発電・送電、産業、民生、運輸、家庭と、局所から広範囲を視野に入れた技術開発が必要である。

#### イ エネルギー生成、送電、蓄電

太陽、風力、バイオマスなどの温暖化フリーエネルギー、水素の製造・輸送貯蔵の高効率化、電池のエネルギー密度の向上が重要である。特に応用物理と関係深い、「太陽光発電技術」のサブロードマップを、それぞれ付録2「資料5」に示す。

太陽光発電の低コスト化に関しては、NEDOが、2010年に発電コストを現在の家庭電力並みの23円/kWhに、2020年に現在の業務用電力並みの14円/kWhに、2030年に7円/kWhに低減することを目標として示している。このためのアプローチは大きく3つある。第1は、より低コストで生産することである。低価格な材料、原料、製造方法の開発、などが含まれる。第2のアプローチは変換効率の向上である。第3のアプローチは太陽光発電システムの信頼性向上である。このシステム

は10年以上の長期にわたって使用するが、信頼性が高く、故障無しで使用できれば、期間全体での出力が大きくなり、実質的に発電コストの低減が実現できる。サブロードマップに示すように、太陽電池の材料はシリコンから有機まで多くの種類が提案され、研究開発が行われている。数種類の太陽電池がそれぞれの特徴を活かしながら、棲み分けを行う可能性も高い。発電システムからみると、太陽光発電は出力変動が大きく、規模が拡大するにつれて電力系統に過度の負担がかかる。この課題に対して、自立度向上型システムが提案されている。

さらに自然エネルギーの供給量の画期的拡大を図るには、究極的には、太陽光から水素を高効率に直接製造・貯蔵する技術が重要となる。その実現を長期的視野で推進する研究開発が必要である。

#### ウ 省エネルギー・高効率化

“情報爆発”に対し、ITシステム、機器の省電力化が重要な課題である。このためには低消費電力デバイス、省エネ型ディスプレイ、省エネ型データセンタなどの技術開発が重要である。目標達成に向けては、システム、装置、デバイス、材料を含む総合的なアプローチが重要となる。特に応用物理学は、先端デバイスの分野において、省電力に関して先導的な役割を果たしている。付録2「資料6」に「低消費電力・高効率デバイス技術」のサブロードマップを示す。デバイスは、現在の技術の延長であるSi CMOS微細化に加え、ナノワイヤーなどの新構造の導入、量子効果デバイスとの融合、MEMS技術との融合、バイオ技術との融合、スピン・分子との融合により、省エネルギー・高効率化のイノベーションをもたらす。

#### エ 環境モニタ

大規模で広範囲の高精度なデータに基づき、定量的な目標とアプローチが必要である。このためには、地球規模のセンサネットワーク、環境用センサ、計測システムの技術開発が重要となる。

#### オ 地球環境予測

地球規模の温暖化と資源枯渇の定量的な予測には、現在の情報処理技術の延長では困難であり、量子力学的効果を直接的に利用する研究が必要である。

#### カ 環境負荷低減資源・代替

レアメタルなどの希少資源に代わる資源の探索・開発が望まれる。

#### キ 低負荷・環境調和製造

超低消費電力で低環境負荷の、材料、デバイス、材料、加工の革新技術により、産業部門のCO<sub>2</sub>排出量を減少させることが重要である。

いずれの分野も長期目標の実現に向け、実用化まで多大なリスクを伴

い、時間を要する研究開発を着実に進めていく上では、一層のエコイノベーションの創出、一層の異分野融合、一層の産官学・機関間の連携、さらに一層の国際的な連携が必要である。またそれぞれの分野は相互に関係しながらダイナミックに進化していく。そこでは、温暖化と資源枯渇の定量的な予測を行い、新技術・システムの方向性を示し、新たな社会システム全体の目標との整合が取れる横断的研究開発を促すことが極めて大切である。いずれも長期の技術開発と投資が必要だが、それゆえに環境・エネルギー対策が新たな経済成長にもなりうる。これにより、国際社会での日本の信頼と存在感のさらなる向上にも直結することが期待される。

環境・エネルギーイノベーションロードマップは、応用物理が環境・エネルギー分野における課題解決の担い手となることの意味表明である。このマップが今後イノベーション創出に向けて大きく貢献するものと確信する。なお、本マップは応用物理学会の環境・エネルギー技術クラスターの将来ビジョン・ロードマップも参考にしながら作成された。今後、応用物理学会をはじめ関係方面と議論を深化させることにより、本マップの改訂を進める方針である。

#### ④ 応用物理におけるエマージング技術・分野への期待

これまで、新原理→新材料→新デバイス→新システム→社会への普及が、絡み合いながら循環する中で、エマージング技術・分野が出現してきた。量子力学の構築、半導体の発見、半導体デバイスの開発、半導体デバイスを用いたパソコンや携帯電話の開発、これらを利用したインターネットの普及、さらにこれらの普及による高度情報通信社会の出現は、この典型例と考えられる。これまでは、より便利で豊かな社会を実現することが大きな目標となり、エマージング技術・分野が出現してきた。しかし、今後は、地球を持続させることが大きな目標となり、温暖化ガス低減技術、省エネルギー技術、省資源技術、代替資源技術、グリーン環境技術、などの分野において、エマージング技術・分野の出現が強く望まれる。特に、レアメタルなどの希少資源に代わる資源の探索・開発が望まれる。その中で、月などの資源を利用する地球外資源利用技術の研究も重要と考えられる。

一方、近年進展が著しい脳科学と応用物理の融合分野において、エマージング分野が出現する可能性がある。中でも脳からの信号を利用して機器などを制御するブレインマシーンインタフェース分野などが注目される。

以上のように、上記の技術開発に密接に関連する「物理とバイオと化学の融合領域」においてエマージング技術・分野が出現する可能性が大

きい。また、エマージング技術・分野の出現を促す、「異」を抑えず、いろいろな「異」がぶつかる機会を多く提供できる教育・社会環境の構築も重要である。応用物理におけるエマージング技術については、今後さらに議論を進める所存である。

### 3 応用物理関連分野における産学連携の将来ビジョン

経済成長へのシーズとなる科学技術分野のイノベーション創出に対する期待は、益々高まっている。しかしながら、日本の人口減少と高齢化はこの先20年間に急速に進み、生産労働人口が半減することが予想されている。一方、近年の中国やインドに代表されるアジア圏の経済成長によって、世界の経済状況は大きく変わろうとしている。日本の産業にとって、経済成長を背景としたこれらアジア諸国の産業力強化は脅威であるばかりでなく、必然的にわが国の産業や科学技術のあり方すら決定してしまう。すなわち、これらの国々の豊富な労働力と先進国からの技術導入スピードの進展に対しては、技術革新による新しい価値の創造と新しい市場の開拓による競争力強化が不可欠になる。また、情報化技術の発展によるグローバル化と共に、科学技術の進展や展開の速度が急速に大きくなっていることも見過ごすことができない事実であり、この速度に対応できる研究開発を成し遂げなければ、産業競争力を保つことはできない。

#### (1) イノベーションの創出と産学連携強化の必要性

イノベーションの創出には、多様でかつ地道な研究開発が必要となる。従来、民間企業における研究開発においては、4～5年の研究期間とそれと同程度の開発期間を必要とし、全体では8～10年程度の研究開発期間を要とした例が多く見られる。しかしながら、わが国の産業界においては、バブル崩壊以降のこの10年間にその研究開発力の低下が深刻化している。したがって、研究開発期間を短縮しかつ効果的な研究開発投資を行うためには、わが国における知的資産の有効活用、またその成果を将来に渡って最大限に生かせる優秀な人材の確保、という視点での仕組みの強化が必要である。産学連携はそのための一つの方法であり、国全体としての知的資産を有効に活用するための重要な役割を持っている。成果の見通せない萌芽的研究や10年先のニーズを踏まえた基礎的な研究開発は、いわば「学」としての役割の一つでもある。しかしながら、わが国においては、産は自前意識が強く、また学は産学連携を積極的に行うという姿勢に乏しかったため、有効な連携は必ずしも果たされて来てはいない。すなわち、長期的展望に立って、研究開発フェーズを階層的に産学で分担するという積極的な姿勢を持つことによって、より効率的に多様なニーズとシーズのマッチン

グが可能となり、イノベーションを創出する契機となり得る。グローバル化が進展する社会情勢を考慮すると、産学連携の強化はわが国が取るべき重要な施策の一つとして位置付けることができる。さらに、ものづくりを担い、次のイノベーションを創出するための人材を実践的に教育する舞台としても、産学連携は有効に機能すると考えられ、その意味においても産学連携の重要性を再認識すべきである。

## (2) 産学連携研究開発の課題

産学連携自身の重要性は、この10年以上に亘って広く認識されて来ている。学の研究者による知的財産権取得やそのライセンスを行うTL0などの制度の創設、大学発ベンチャー育成制度等、産学連携を巡る様々な政策も実施されてきており、学の研究者の産学連携に対する意識も向上してきている。現状では、連携に対するノウハウが蓄積されつつある状況ではあるが、一方で、学と産の両者の間に産学連携に対する問題点や意識のずれが依然として存在するのも事実である。

### ① 多様な連携モデルや各々の連携フェーズに対応できるコーディネータの育成

産学連携は、それ自身が目的ではなく、イノベーションを創出するための一つ的手段である。また、それぞれの産学連携に対する期待や研究開発フェーズは様々であり、多様なタイプの連携モデル、制度設計が必要となる。特に、学の基礎研究と産の開発研究をシームレスに繋げるためには、連携の仕方をいかにコーディネートするかが重要なポイントとなる。例えば、共同研究のスタート時とある程度進んだ段階では、共同研究契約自身の内容も異なってくる。また、それ以前のシーズとニーズのマッチング段階においては、経験と広い知識を持つ者による橋渡しが必要となる。ライセンスにおいては既にコーディネータが活躍し始めているが、産学連携の様々な場面において、学と産の立場を踏まえた有効な連携を実現するためのコーディネータの役割を重要視すべきである。その存在によって、基礎的な研究開発を行う者とそれを実際の応用開発に繋げていく者の役割分担が明確化される。今後の産学連携の有効活用においては、多様な連携フェーズに即した対応が可能なコーディネータの育成と導入が不可欠であり、そのための育成プログラムの整備が望まれる。また、コーディネータには技術と産業に対する見識が不可欠であり、ポストクのキャリアパスの一つとしても、シルバー人材の活用法の一つとしても期待できる。このようなコーディネータの育成のためには、産による財政的支援と学による産学連携(関係)論の構築が不可欠であり、学が一体となって育成プログラムの開発にあたる必要がある。

また、学会はこのような育成プログラムの実施に役割を果たすべきと考える。

## ② 長期戦略に基づいた省庁連携型ファンディングの充実

また、産学連携における問題点の一つとして、縦割り行政的なファンディング体制がある。イノベーションの実現には、長期的展望に立った階層的な研究開発体制の整備が必要であり、それぞれの階層における連携の強化を基にしたシームレスな研究開発体制を構築することが、国としての産業競争力の強化に繋がる。例えば、10年後、20年後を見据えたナノエレクトロニクス技術の研究開発を、経済産業省と文部科学省が連携してファンディングを行うことにより、基礎から応用まで繋がった研究開発体制を産学で連携して創り上げることができる。最近、科学技術振興機構と経済産業省のプロジェクトを連携して行う試みが始められていることはこの意味で評価できる。長期的展望に立った科学技術政策を基にして、戦略的なファンディングを省庁が連携して行うことで、国としてのイノベーション創出の原動力に繋げていくことが重要である。

## (3) 産学連携人材育成の強化

### ① 研究インターンシップの活用による大学院学生と若手研究者の育成

人材育成や流動化という観点でも産学連携は重要である。特に、少子化による労働人口の減少に拘わらず科学技術立国としての優位性を維持するためには、高度専門教育を受けた質の高い人材を育成しなくてはいけない。そのためには、学と産が一体となって高度専門人材を育成するという体制が必要である。産学共同研究への大学院学生の参加は、ニーズとシーズの関係を理解するための格好の教育場面であり、さらに、研究インターンシップを活用することで実践的な技術者教育を提供できる。そのためには、高度専門教育プログラムとして研究インターンシップを産と学の両方で明確に位置付けることが必要である。また、この研究インターンシップには、大学院生のみならず若手研究者の参加も必要であり、情報の共有化や人材交流の契機として、さらには共同研究などへの展開も期待できる。例えば、一定期間内に企業の開発現場で大学院生と若手研究者が分担して課題解決を図るなどの新しい試みを検討することが必要である。

### ② 高等専門教育の実質化と産学連携

一方、産業界で必要とする人材をどのように教育するか、ということも重要な視点である。韓国においては、半導体メーカーが大学に専門教育のための専攻を創設したという例もある。これは極端な例であるが、産

業界が自ら必要とする人材の育成に積極的に関わるという姿勢が優秀な人材の育成とその確保には不可欠である。先端技術は益々先鋭化し、一方、イノベーションを創出するための異分野融合の必要性も叫ばれている。このような状況の中で、ともすれば大学院教育に対する批判のみに陥りやすい教育改革に対して、大学でのカリキュラムと産が必要とする教育の間を埋める教育プログラムを産側からも提供することによって、より高度で実践的な高等専門教育が実現できる。具体的には、産として必要な具体的な教育カリキュラムの提示、研究インターンシップと連動した講義の実施、高等専門教育を行うための寄付講座や実際の講義の提供などが考えられる。特に、基礎学問と先端技術の間、あるいは異分野間を埋めるための教育プログラムの構築のためには、産と学とのインターフェースである応用物理学会などの学会が大きな役割を果たすべきであり、学会として種々の分野のシルバー人材を活用することでより多様で広がりのある実践的教育も可能となる。産と学との研究開発に対する視点や目的の違い、またそれらの広がりを経済的な視点から理解することによって、産学連携による研究開発の実質化や人材育成、人材の流動化が図られる。

#### 4 応用物理関連分野における人材育成の将来ビジョン

我が国は、外貨獲得の大部分を科学技術に依存しているにもかかわらず、先端科学技術における国際競争力が、急速に落ちつつある憂慮すべき事態にある。将来に亘って経済的に国際的優位性を維持するためには、科学技術を担う研究者、技術者の質、量両面での確保が必須である。しかし、先ず、量的な側面について言えば、現在すでに18歳人口は、1990年代初頭の約210万人の約6割まで減少していること、10年後からは、さらなる減少が確定していること、また、一方では、科学技術者の人材育成の中心的役割を担う工学系学部への進学志望者の漸減や理科離れ・物理離れの実態は、深刻さを増している。質的な側面では、科学技術の高度化により、それを支える科学技術者には益々高い学力が要求されるようになる一方で、ゆとり教育の結果、大学入学者の学力は低下し、意欲も低下している。

このように量、質両面で人材確保に大きな不安を抱えている。既に向こう20年間の大学卒業生数の上限が確定しており、人材育成は、たとえ新カリキュラムの即時導入を図っても、大学卒業生に反映されるのは、15年後となる長期的な事業であるため、その対策は緊急を要する。

このような状況の下、我が国の科学技術の発展を担う理工系の人材確保に向けて、以下の対策を提案する。

## (1) 人材の量的確保

我が国は、科学技術立国を標榜しているにも係わらず、大学理工系学部学生の割合は4割に満たず、さらに、人口減少の中で工学系学部志望者の割合も減少しつつある。企業は、この理工系人材の不足を補うため、文系学部卒業生の社内教育による専門転換や海外からの科学技術者の積極的な採用を行うようになりつつある。トップの人材のレベルを上げるためにも、潜在的な理工系人間の割合を増大させることが必須である。人材の量的な確保にかかる対策を以下に述べる。

### ① 将来の産業構造を勘案した人材の必要数の将来計画の策定と教育・社会体制への反映

我が国の大学学部の構成比は、学生側の志望は反映されても、社会の人材要求を十分反映するものとはなっていない。長期的には、産官学が協力して将来の産業動向と人口減少を考慮した人材育成計画を構築し、それを実現する教育体制の整備が必要である。一方、これまで、私立大学や国立地方大学の理工系学部は、理工系人材供給で大きな役割を果たしてきたが、法人化や助成の減少により、特に多額の設備を必要とする理工系学部での教育基盤が揺らぎつつあり、私立大学の理工系学部の定員を維持するためにも支援の強化が緊急の課題である。理工系学部への進学者を増大させるという点では、女性は人材の宝庫であるが、女性が長期的に働くための社会環境の整備が必須となる。また、女性が理工系の大学に進学する事に対する社会の偏見の解消が必要なことは云うまでもない。国民全体の科学技術リテラシーの向上は、その実現に有効であるが、同時に潜在的な理工系人材の拡大にも有効である。科学技術リテラシーの向上のためには、文系の大学のカリキュラムにおける理系科目の強化や最先端の科学技術をわかりやすく、また面白く伝える人材の育成や仕組みの構築も必要となる。

### ② 初等中等教育の理科教育体制の整備

「理科離れ」が叫ばれ久しいが、真に問題とすべきは、高等学校における履修率が2割しかないという「物理離れ」の実態であろう。21世紀の産業の糧となるナノテクノロジーを支えるのが物理であることを考えれば、これは真に憂慮すべき事態である。今日、我々の身の回りの機器には最先端の科学技術が満ち溢れており、高校の物理は、それらを正しく使うための最低限の科学技術リテラシーとなりつつある。この意味で高校の物理の必修化を真剣に検討すべきである。また、初等中等教育において将来「物理好き」となる下地を作ることが重要であるが、次

世代の初等教育を担う教育学系学部進学者における「物理」好きは2割に満たない。初等理科教育を充実するためには、最先端の科学技術の研究に携わり、その面白さを十分に知っている理工系大学院出身者を初等教育の専科教員として採用し、配置することが、緊急の課題である。しかし、現在、科学技術の面白さを伝えることのできる工学系大学院修了者が、「理科」の教員免許を取得するには、所属する学科・専攻のカリキュラムに加えて理学部物理系の科目を履修することが要求されるため、容易ではなく、初等中等教育教員への門戸を開くための法整備が急がれる。

### ③ 産業界における科学者・技術者の地位と処遇の向上

高校生が大学の理工系学部を志望しない大きな理由は、理工系の学部を卒業するため必要な経済的・時間的多くの負担が、生涯賃金等の点で見合わないということである。科学者・技術者が、産業界において果たしている役割を正当に評価され、処遇されることが、理工系人材の確保に不可欠である。しかし、現状では、科学者・技術者を正当に処遇する仕組みを欠いている。欧米では、博士の学位取得者は、産業界でも十分な処遇を受けているし、また、プロフェッショナル・エンジニア、チャータード・サイエンティストなどの資格が機能している。確かに我が国にも、「技術士」という大学学部卒業程度の教育を前提とする国家資格と、その予備教育としての日本技術者教育認定機構(JABEE)による教育機関の認定制度があるが、十分な機能を果たしていない。そこで、大学院レベルの高度な能力を有する科学・技術者を高く処遇する新たな仕組み、産官学が連携して新たな資格等を整備することが必須である。

## (2) 人材の質的な確保

ゆとり教育の結果として、大学入学者の能力は、大幅に低下している。一方、科学技術の進歩により、その研究開発には益々高度な基礎学力が求められるようになっており、そのギャップは、広がるばかりである。一方、先端科学技術において高い国際競争力を有する国々では、初等中等教育を受ける子供達が高い理科の能力と向上意欲を備えていることは、示唆的である。したがって、我が国の科学技術における国際競争力を高めるためには、科学技術を支える人材の質の確保が緊急の課題である。この人材の質的な確保をするためには、以下の対策が求められる。

### ① 高等教育修了者の基礎学力の向上

教育機関が提供する人材に求められる基礎学力は、本来、人材の受入側が何を求めるかが反映されるべきである。そこで、まず、産官学が協

力して、高等教育の修了者に求められる基礎学力を明らかにし、それを基準にして、初等、中等高等教育のカリキュラムを構築するような体制を構築すべきである。また、卒業生の質を保証するためには、入学は難しいが卒業は易しいという現在の大学の体質を改め、卒業要件の厳格化が求められる。さらに、今日の教育カリキュラムに於いて最も欠けている企画力、評価力、指導力を養う教育の充実が不可欠となる。その実現には、産官学の人材交流が鍵となると考えられる。

## ② 高い将来性を有する学生の優遇・支援

今日の初等中等教育では、如何に最低レベルを上げるかが大きな関心事となっており、高い学力を有する学生・生徒への手当を欠いている。科学技術の進歩を支えるのは、トップレベルの人間であることを考えれば、同時に、優れた素質を有する学生を如何に延ばすかが、重要な課題である。そのためには、成績優秀者を優遇し、その素質を伸ばす仕組みの導入が必須である。例えば、高い学力や素質を備える学生が、抵抗なく大学院、特に博士課程への進学を選択出来るような経済的支援の充実も重要である。博士課程在籍者には、少なくとも日本学生支援機構の第一種の奨学金の貸与の権利を保証すると共に、その一部給付や返還免除枠の拡大を検討すべきと考えられる。

## ③ 高等教育機関への海外からの優秀な人材の採用

今後の人口減少を考慮すると、国内で不足する人材を海外から採用することも重要である。しかし、海外の人材が、我が国で長期にわたり活躍するには、無形有形の障壁がある。したがって、優れた人材を海外から集めるためには、障壁低減への法・制度整備が必要である。また、海外の優れた素質を有する学生が、我が国の大学、大学院に進学して、卒業後我が国に定着する流れをつくるのが最も有効であるが、そのためには、海外の学生に魅力的な高等教育カリキュラムを提供することが必須である。

## (3) 博士課程修了者に対する出口の確保

最先端の科学技術の革新的な発展は、トップレベルの人材、即ち秀でた一握りの科学者・技術者に負うところが大きい。潜在的な理工系人材を増やすことは、トップの能力の向上に有効ではあるが、トップレベルの人材の能力をさらに高める対策が必要である。そのためには、優れた素質を備えた学生を博士課程に集め、その教育を通して能力を高め、科学技術の研究者としてのみならず、科学技術政策や企業戦略の立案を担う官界や産業界のリーダーとして活躍できるような体制を作ることが必須である。その

実現には、大学の教育研究費の充実と大学教員の雑務を減じ、教育に専念できる体制の整備に加えて、次に述べるような大学のみならず、産業界、社会に変革が求められる。

#### ① 産学官人材流動化と博士修了者のキャリアパスの整備

優れた人材が博士課程に進学しない原因は、終了後のキャリアパスが、アカデミックポストに限定されているために、修了後に不安があること等が大きい。博士課程修了者のキャリアパスが、主としてアカデミックポストに限定される原因は、博士課程の教育が、アカデミックポストを目指したものであることが直接の原因である。しかし、博士課程修了者が産業界で十分な処遇を受ける欧米諸国と異なり、我が国では、博士課程を修了して産業界に就職しても教育への投資に見合う十分な処遇が期待できない点に根本的な原因がある。この状況を打開するためには、これまで高度な専門性のみを追求してきた博士課程の教育に、官僚や産業界のリーダーへ要求される企画力、評価力、マネジメント力等を養うカリキュラムを導入すること、インターンシップの更なる活用が有効と思われる。またこれらの対策の実現には、産業界の支援が不可欠であり、産学間の人材交流も必須と考えられる。また、欧米諸国と比較すると、我が国の官僚や政治家に理工系博士の学位保有者が少ない。理工系の博士保有者を官僚として優遇する仕組みを作ることは、科学技術政策の質を高めるのにも有効であるが、同時に我が国の国際的な発言力の向上にも寄与すると考えられる。また、上述のように、特に工学系の博士保有者に対する理科教員免許取得への障壁を下げ、初等中等教育教員への門戸を開放することも必要である。また、博士課程在籍学生やポストドクターと産業界のマッチングをとる仕組み、例えば、人材バンクの整備などの構築が必要である。この意味で、博士課程学生・ポストドクターと産業界の両方の研究者が集う、例えば応用物理学会の果たすべき役割は大きい。

#### ② 博士課程に関する意識改革と修了者に対する処遇の改善

理工系の博士課程進学者数を増大させるためには、博士課程進学者やポストドク自身のキャリアパスに対する意識改革が重要である。しかし、それに加えて、産業界、社会の意識改革が必要である。また、そのためには、前述した博士課程修了者を対象とする資格の整備に加えて、産業界が求める教育の実現が前提となるが、産業界での処遇の改善が欠かせない。

## 5 おわりに

本報告では、科学技術の中核的な学問である応用物理の発展をめざして、応用物理の将来ビジョンを検討した。まず、研究開発の将来ビジョンとして、応用物理学会の将来ビジョンマップの策定の経緯およびその内容について記述するとともに、応用物理が環境・エネルギー分野の課題解決の担い手になる、という決意を込めて、環境・エネルギーイノベーションロードマップ(試案)を作成した。次に、研究成果を有効に活用し、世界レベルに発展させていくために、産学連携による研究協力体制に関して将来ビジョンの検討を行った。さらに、発展性のある基盤構築に向けて、次世代を担う人材の育成・教育について包括的視点から将来ビジョンを議論した。今後、本報告が応用物理学のみならず関連学術分野の発展や、人材の育成の議論に向けて有益な資料となることを期待する。

## <参考資料> 総合工学委員会未来社会と応用物理分科会審議経過

### 平成 18 年

- 12月21日 日本学術会議幹事会（第30回）  
未来社会と応用物理分科会の設置

### 平成 19 年

- 1月25日 日本学術会議幹事会（第32回）  
未来社会と応用物理分科会委員の決定
- 3月6日 未来社会と応用物理分科会（第1回）  
・今後の活動について  
・将来ビジョンWG、産学連携WG、人材育成WGの設置について
- 6月22日 未来社会と応用物理分科会（第2回）  
・各WGの取り組み状況について
- 11月5日 未来社会と応用物理分科会（第3回）  
・各WGの取り組み状況について  
・今後の進め方について
- 11月5日 未来社会と応用物理分科会 将来ビジョンWG  
・アカデミックロードマップの策定について
- 11月5日 未来社会と応用物理分科会 産学連携WG  
・産学連携に係る部分の報告書の構成について
- 11月5日 未来社会と応用物理分科会 人材育成WG：  
・人材育成に係る部分の報告書の構成について

### 平成 20 年

- 2月10日 未来社会と応用物理分科会幹事会（第1回：電子会議）  
・報告書案について  
・今後の進め方について
- 3月4日 未来社会と応用物理分科会幹事会（第2回）  
・企画委員会での審議状況について  
・今後の進め方について  
・報告書案について
- 6月24日 未来社会と応用物理分科会（第4回）  
・分科会活動報告  
・報告案「応用物理の将来ビジョン」について
- 7月24日 日本学術会議幹事会（第60回）  
未来社会と応用物理分科会報告「応用物理の将来ビジョン」について承認

<付録 1>

応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書

応用物理学会発行(2008年3月28日)

全文は、下記(社)応用物理学会HPに掲載されています。

[http://www.jsap.or.jp/jsap75/academic\\_roadmap.html](http://www.jsap.or.jp/jsap75/academic_roadmap.html)

資料1

## 環境・エネルギーのイノベーションと応用物理

### 社会的課題

- 地球の持続可能性を脅かす課題の顕在化  
人口増大、資源・エネルギー、気候変動、環境、水、食糧、テロ、感染症
- 少子高齢化社会の急速な進展
- グローバル経済化での産業構造の見直し

### イノベーションの鍵

- 異分野の知の融合と活用：  
自然科学、社会科学、  
人文科学など
- グローバル連携
- 研究開発の重視
- 多様性の追求
- 人材育成

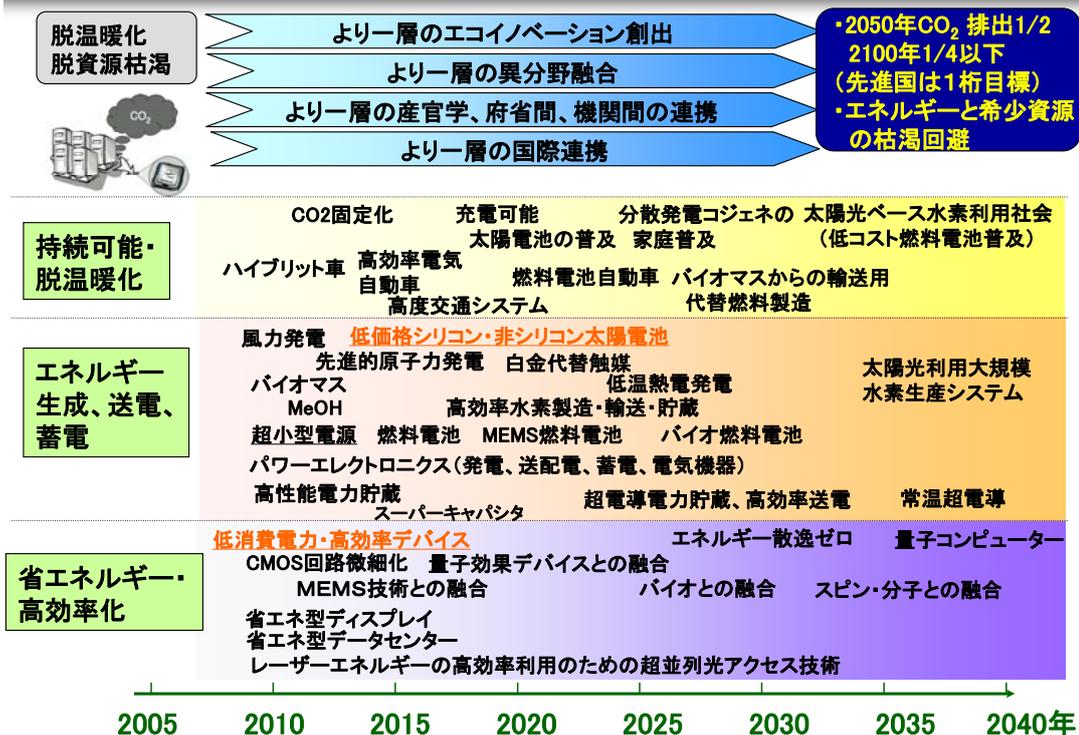
### 応用物理の環境・エネルギーイノベーションへの貢献

- 人間、社会の視点からの技術革新に貢献。  
資源消費型成長社会から持続発展可能な社会へ。
- “世界全体の持続可能性”に貢献するマクロで  
定量的視点からの研究開発に貢献。
- 産学官連携、異分野・異業種の融合、  
さらには国際連携の促進に貢献。
- 応用物理によるエマージェント技術の貢献。

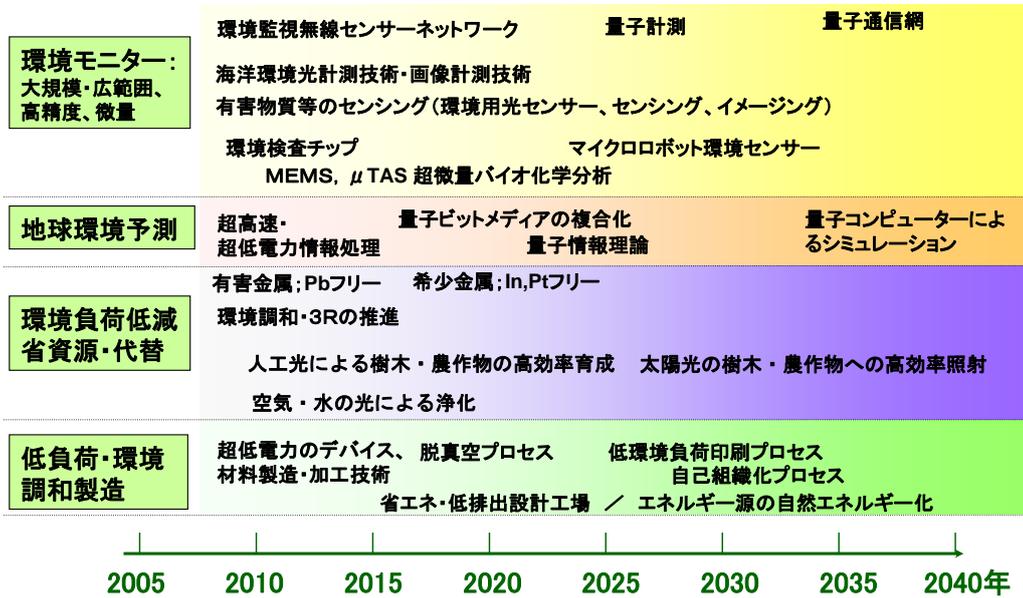
→ 応用物理は地球未来社会の永続的發展に貢献

資料2

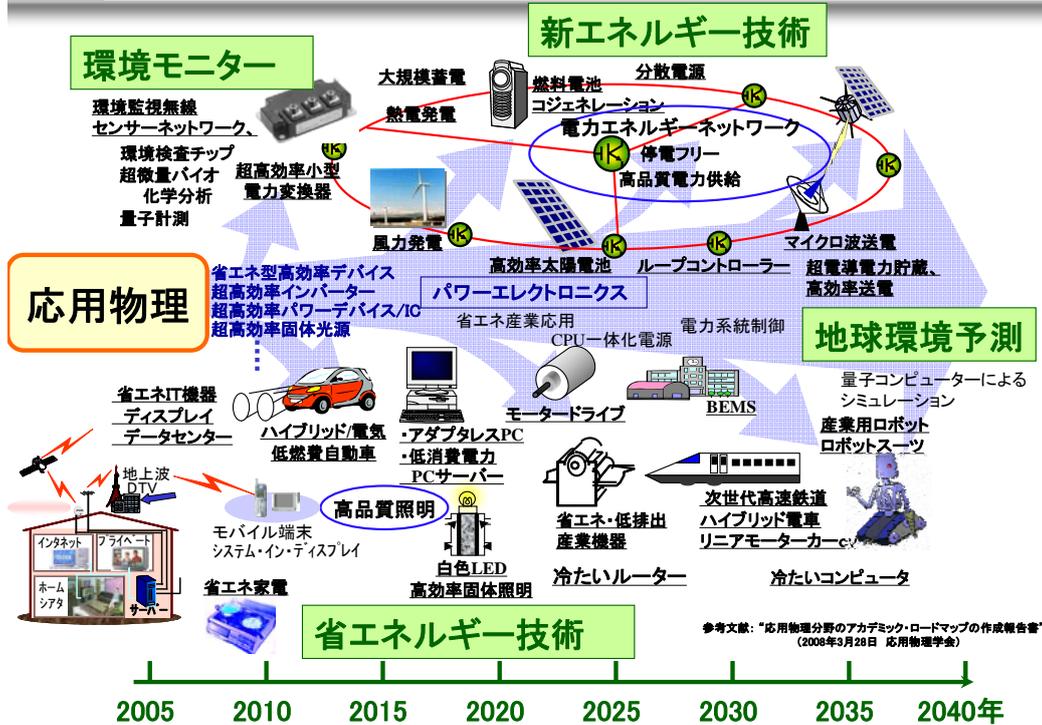
## 応用物理が拓く環境・エネルギーイノベーションロードマップ(1)



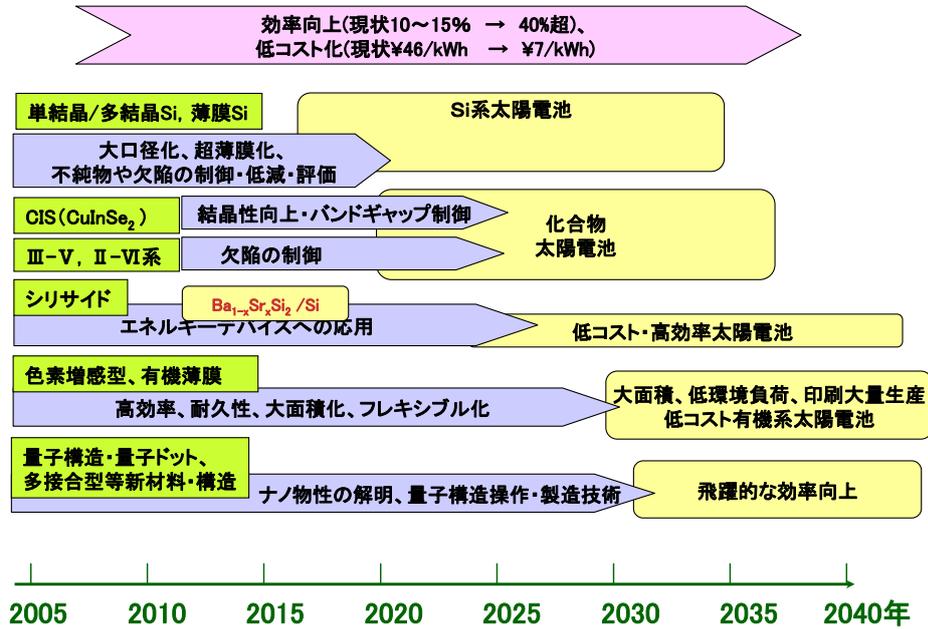
資料3 応用物理が拓く環境・エネルギーイノベーションロードマップ(2)



資料4 応用物理が拓く環境・エネルギーイノベーション

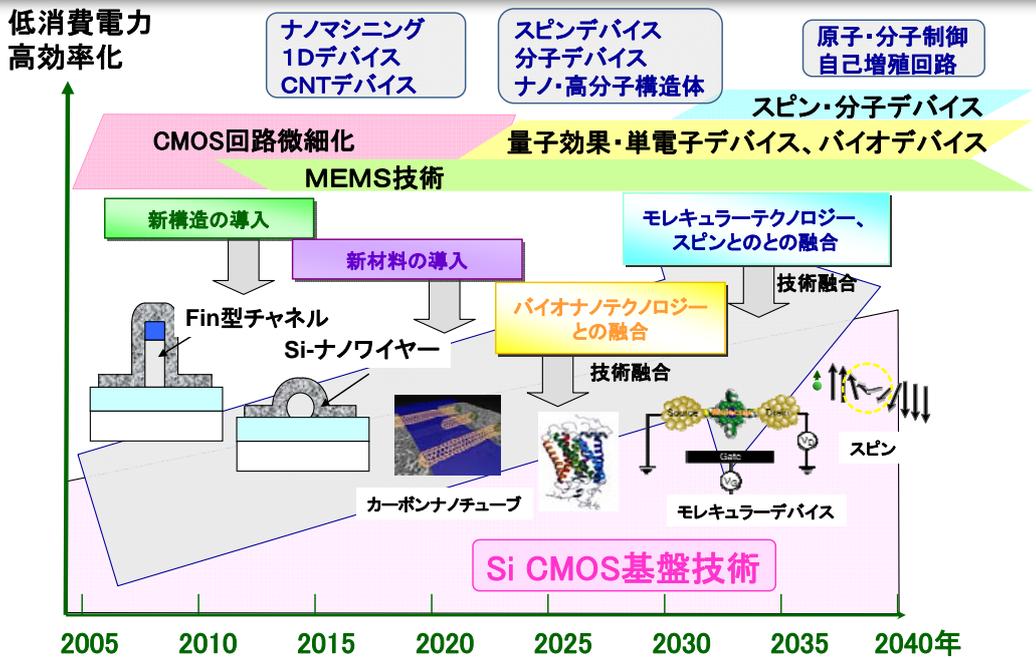


資料5 サブロードマップ(1) 太陽光発電技術



参考文献: "応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書" (2008年3月28日 応用物理学会)

資料6 サブロードマップ(2) 低消費電力、高効率デバイス技術



参考文献: "応用物理分野のアカデミック・ロードマップの作成報告書" (2008年3月28日 応用物理学会)