

報 告

グリーン・イノベーション実現に向けての
研究課題と展望
—材料研究を中心として—



平成22年（2011年）9月30日

日 本 学 術 会 議

材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、

土木工学・建築学委員会、化学委員会合同

グリーン・イノベーションの材料分科会

この報告は、日本学術会議日本学術会議材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料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

材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会委員

委員長	馬越 佑吉 (第三部会員)	大阪大学名誉教授
副委員長	岡田 益男 (連携会員)	八戸工業高等専門学校校長 (東北大学名誉教授)
副委員長	長井 寿 (連携会員)	(独) 物質・材料研究機構中核機能部門長、 ナノ材料科学環境拠点マネージャー
幹事	松宮 徹 (連携会員)	新日本製鐵(株) 顧問
	柘植 綾夫 (第三部会員)	芝浦工業大学学長
	前田 正史 (第三部会員)	東京大学理事・副学長
	村上 周三 (第三部会員)	(独) 建築研究所理事長
	井上 晴夫 (連携会員)	首都大学東京教授
	魚崎 浩平 (連携会員)	(独) 物質・材料研究機構ナノグリーン分野 コーディネータ (北海道大学名誉教授)
	加藤 雅治 (特任連携会員)	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
	小林 敏雄 (連携会員)	(財) 日本自動車研究所副理事長・研究所長 (東京大学名誉教授)
	庄子 哲雄 (連携会員)	東北大学大学院工学研究科卓越教授
	関村 直人 (連携会員)	東京大学大学院工学研究科教授
	豊田 政男 (連携会員)	(独) 科学技術振興機構 JST イノベーションプラザ大阪館長 (大阪大学名誉教授)
	中村 崇 (連携会員)	東北大学多元物質科学研究所教授
	東 健司 (連携会員)	大阪府立大学大学院工学研究科教授
	牧島 亮男 (連携会員)	北陸先端科学技術大学院大学名誉教授・シニアプロフェッサー
	山本 雅彦 (連携会員)	大阪大学名誉教授・招聘教授

なお報告書及び参考資料の作成にあたり、以下の方々に御協力いただきました。

足立芳寛	東京大学大学院工学系研究科	教授
岡部 徹	東京大学生産技術研究所	教授
金子祥三	東京大学生産技術研究所	特任教授
久村春芳	日産自動車株式会社	フェロー
知京豊裕	(独) 物質・材料研究機構 MANA	ナノエレクトロニクス材料ユニット長

西村 睦 (独)物質・材料研究機構 水素利用材料ユニット長
西山 孝 京都大学 名誉教授
福岡 淳 北海道大学触媒化学研究センター センター長、教授
堀池靖浩 独立行政法人物質・材料研究機構 名誉フェロー
御園生誠 日本化学連合会長、東京大学 名誉教授
野城智也 東京大学生産技術研究所 所長・教授

要 旨

1 作成の背景

鉱物、化石燃料等の資源に乏しい日本において、グリーン・イノベーション実現のためには、新たな機能を有する物質・材料の開発とその特性・製造工程改善における重要点、さらにそれを使用する社会基盤について、材料を作る側、使う側双方の視点から幅広い学術分野の研究者が意見交換し、課題解決に当る必要がある。そのため、日本学術会議第三部に材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会を設置した。本分科会では、グローバルな視点での日本が推進すべき長期戦略、とりわけ材料研究とその利用技術に注目して、その課題抽出を行うと共に、今後とるべき施策の方向性についての提言を含めて議論の結果を本報告にまとめた。

2 エネルギー問題と材料

(1) エネルギー供給・貯蔵技術

日本は火力発電を徹底的に効率化してきた。第1世代（蒸気タービン）はほぼ飽和状態になっている（発電効率41%程度）。第2世代（ダブル複合発電）では、1600℃で54%の効率が達成されようとしている。コーティングによる断熱技術などの寄与が大きい。今後、第3世代（トリプル複合発電）として、天然ガス焚で65%、石炭焚で55%の超高効率の実現が期待される。高温型燃料電池の高機能化、高安定性が鍵を握る。

太陽光発電パネル用材料は、高効率化、低廉化が課題である。メガソーラ用では、集光を組み合わせて、高効率化、低廉化を目指す多接合型の開発が、家庭用などの薄膜型では、低廉化を目指し、非集光の色素増感型、有機薄膜、量子ドット型などの開発が行われている。

燃料電池では燃料水素の供給がこれからの課題である。現在は安全性向上や輸送経費低下が期待できるメタノールなどの液体燃料を用いているが、反応効率が低い、性能低下しやすいなどの問題があり、その克服のためには燃料極の電極触媒の開発が必要である。特に触媒用 Pt は高価な希少資源であり、貴金属フリーとすることが喫緊の課題である。

エネルギーの供給と需要の時間的ずれに対応するエネルギー貯蔵が必要である。特に太陽や風力などの再生可能エネルギー利用促進には不可欠である。現在最も注目されているのが化学エネルギーとして貯蔵する二次電池である。運輸・交通の高効率化にも、電力ピークカットを目的とする定地型エネルギー貯蔵にも使用可能な高密度・高出力の二次電池開発が課題である。

(2) 未普及エネルギー技術

グリーンケミストリーでは重点を製造工程から、製品やサービス、特に、市民生活に近い化学技術に移行すべきである。その際に環境負荷やエネルギー・資源の消費を抑え

つつ、生活を積極的に豊かにする製品、サービス、システムなどの目標提示が重要になる。

水素製造には一次エネルギーの投入が必要である。現状ではメタンからの改質が全体の半分近くを占めるので、改質触媒開発は重要である。より長期的には、水から分解生成する光触媒や光電極が課題である。また、水素利用のためには、高純度水素精製技術、安全かつ高密度貯蔵技術の確立も必要である。

ほぼ無尽蔵な太陽光エネルギーは最も有望なエネルギー源と言えるが、供給不安定性を伴う。そこで、水素や二酸化炭素の還元生成物を太陽光エネルギーにより製造、貯蔵し、必要な時に必要な量を取り出す、人工光合成（太陽光による化学燃料生産システム）が有望である。

バイオマスは再生可能エネルギーの一つとして注目される。廃棄物や未利用資源などの非可食バイオマスを化学品たとえばプラスチックに変換する技術開発が重要である。植物が含むリグノセルロース分解法の高効率化が鍵を握る。

(3) 省エネルギー技術

運輸、輸送や電力輸送における省エネルギーの鍵を握るのは材料であるが、システム全体を俯瞰しボトルネックを捉える視点が必要で、専門分野を超えた連携が求められる。素材製錬・製造、製品製造工程、化学製造工程での省エネルギー対策と炭酸ガス排出量削減が極めて重要である。

(4) 政策提案

① 短中期的政策

製造業のさらなる省エネルギーが必要である。そのために重点を置くべき材料は、特定物質のみを透過する分離膜、高性能の断熱材料、特定の物質を選択的かつ高速で製造するための触媒などである。さらに、どのような材料開発が社会に求められるのかを正しく抽出するためのツールとして、材料の資源、製造、利用、循環使用までの全過程から描ける時間軸を持った社会全体構想モデルを構築する必要がある。

② 中長期的政策

資源産地制約から解き離れるために、化石資源から太陽光等の再生可能エネルギーへ転換しなくてはならない。その中で、太陽光エネルギーが最も望ましい。高効率で安価で、投入エネルギー以上のエネルギーが得られる、太陽電池、人工光合成などの開発を継続し続ける必要がある。さらに地域によっては風力エネルギー、地熱エネルギーも重要となる。

3 資源問題と材料

(1) 社会基盤のグリーン化

社会基盤構造物の資源生産性を物理的耐久性のみならず機能的持続性向上による使用年数の延伸について分析する必要がある。また、構造物をティッシュ、スケルトン、

インフィルの3階層システムに分離して設計し、階層ごとに使用年数や要求条件を考慮して素材開発がなされるべきである。

(2) 政策の提案

① 現未来（0～5年先）を見越した提案

先端技術産業と資源産業が一体となり需要予測量を算出し、予測に基づき鉱石から素材流通にボトルネックを作らない準備と対策を講じることが求められる。偏在希少資源については、先端技術産業と資源産業がリスクを共有し、供給先を多様化して偏在性を減少させ、流通にボトルネックができないようにすべきである。ベースメタルについては、資源メジャーとも協力を深め輸入量の安定確保を図ること、資源メジャーが対象としない中・小規模鉱山の独自開発を積極的に行うこと、それらに従事する人材育成を行うことが必要である。

② 現未来（5～50年先）を見越した提案

新鉱床探索、省資源化、代替材料の開発および実用化、リサイクルの4つを愚直に進めることが基本になる。特にベースメタルでは、低品位鉱など準経済的資源の開発準備を進める。代替材料開発においては、どのように製造されているか、資源がどのくらいの量、価格で取得できるかなどを総合的視点で開発方針を決定することが必要である。非常に厳しい資源制約がある希土類元素、W、PGMの性能を代替できる技術は未開発であり、特に重要である。

4 グリーン・イノベーションに向けた拠点形成と人材育成のための政策提案

教育、研究とグリーン・イノベーション課題解決を一体化し、全国的な研究者連携を可能にする、グローバルな産官学共同研究拠点形成事業の実施が望まれる。材料工学を核とし、専門分野の垣根を越えて企業、公設機関、大学等が連携して、基礎研究、基盤研究、応用研究を行うものでなければならない。また、研究環境充実のためには、キャリアパスにも十分配慮する。若いテクニシャンの育成も極めて重要である。

目 次

1	はじめに	1
2	エネルギー問題と材料	2
(1)	低炭素化社会実現のためのエネルギー供給・貯蔵技術の課題と展望	2
①	火力発電の課題と展望	2
②	太陽光発電の課題と展望	4
③	燃料電池の開発の課題と展望	5
④	エネルギー貯蔵技術の課題と展望	5
(2)	環境調和型未普及エネルギーの課題と展望	5
①	グリーンケミストリーの課題と展望	6
②	水素製造・利用技術の課題と展望	7
③	人工光合成の課題と展望	7
④	バイオマスの課題と展望	9
(3)	省エネルギー技術開発の課題と展望	9
①	運輸、輸送における省エネルギー化のための材料開発	10
②	電力輸送における省エネルギー化のための材料開発[4]	11
③	材料製造における省エネルギーのための技術開発	12
(4)	グリーン・イノベーションのためのエネルギー政策の提案	13
①	中長期的政策：エネルギー基盤を化石資源から太陽光等の再生可能エネルギーへ転換	13
②	短中期的政策：省エネルギー・省資源・低炭素化のための社会シミュレーションモデルを構築	14
③	短期的政策：省エネルギー化のための材料開発	15
3	資源問題と材料	16
(1)	社会基盤のグリーン化の課題と展望	16
①	建造物のグリーン化の課題と展望	16
②	グリーン化のためのシステムインテグレーション	17
(2)	グリーン・イノベーションのための資源政策の提案	18
①	資源確保の戦略	18
②	代替材料開発	20
4	グリーン・イノベーションに向けた拠点形成と人材育成のための政策提案	21
	<参考文献>	23
	<参考資料> 審議経過	24
	<引用資料>	25

1 はじめに

地球ならびに資源は有限であり、その地球に 70 億近い人々が生存するためには、環境といかに調和し、限りある資源とエネルギーを有効に活用することが必要不可欠である。とりわけ鉱物、化石燃料等の資源に乏しい日本においては、そのための技術革新が不可欠である。第 4 期科学技術基本計画においても、ライフ・イノベーションとともにグリーン・イノベーションが最重点目標として設定され、その具現化のための取り組みが推進されている。

エネルギーの安定供給と、低炭素社会実現の双方を睨めば、火力（石炭、石油、LNG）発電、原子力発電、太陽光・水力・風力・地熱発電等の再生可能エネルギーのバランスある活用が必要である。しかし、平成 23 年 3 月 11 日に東北地方を襲った東日本大震災による福島原発事故は、その電力供給の 3 割を依存してきた原子力発電の安全性に疑問を投げかけている。今後、日本が取るべきエネルギー政策の選択・方向性については、日本学術会議東日本大震災対策委員会エネルギー政策の選択肢分科会が提言「日本の未来のエネルギー政策の選択に向けて一電力供給源に係わる 6 つのシナリオ」を纏めており、ここでは言及しないこととする。

グリーン・イノベーション実現のためには、新たな機能を有する物質・材料の開発とその特性・製造工程改善が重要である。しかし、材料、エネルギーを提供する側の研究のみならず、いかにエネルギーを効率よく利用し、省エネルギーを達成するかも極めて重要である。したがって、材料を作る側、使う側双方の視点で幅広い研究分野の研究者が意見交換し、課題解決に当る必要がある。

そのため、日本学術会議第三部に材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会を設置した。本分科会では、グリーン・イノベーション実現のために、化石燃料の効率利用技術、太陽光発電、燃料電池等から人工光合成といった再生可能エネルギーに関する材料を作る側の研究課題について検討すると共に、省エネルギー、二酸化炭素ガス排出量削減を達成のための運輸、建造物といった社会基盤のグリーン化といった使う側の視点でも検討を行うこととした。また、平成 23 年 6 月 1 日に同上分科会が開催したシンポジウム「グリーン・イノベーション実現に向けての材料研究課題と展望」における講演ならびにパネル討論の内容（構成上、引用資料の末尾に添付⑬）も含め、グリーン・イノベーション実現のためのグローバルな視点での日本が推進すべき長期戦略、とりわけ材料研究とその利用技術に注目して、その課題抽出を行うと共に、今後とるべき施策の方向性について提言をまとめた。本提言を参考に関連政府機関、産業界が具体的研究課題を立案・実施し、科学・技術によって地球にやさしく人類の持続的発展を可能にする社会を実現することを期待する。

2 エネルギー問題と材料

いま、日本経済には将来の全体構想が必要である。2030年の日本の社会は、総人口が1.15億人、それに伴って労働力人口も6,180万人となり、それぞれ2005年よりも減少する。このような状況下においても豊かさを維持し、持続的な経済成長を達成するためには、その経済活動に必要なエネルギーと資源を供給し続けなければならない。

2009年8月の長期エネルギー需給見通しでは、最終エネルギー消費の推移について2030年までの2つのモデルが提案されている。一方は努力継続モデルであり、他方は省エネルギー化技術最大導入モデルである。現在の福島第一・第二原子力発電所が稼働していない状況、さらに他の原子力発電所の運転状況を考慮すると、最大導入モデルが想定する2015年頃の省エネルギー化が進んだ段階の最終エネルギー消費に、今すぐ移行しなければならないこととなる。この解決策として、再生可能エネルギーの有効利用の促進と関連する技術開発が打ち出されている。しかし、この方針だけでは経済発展を支えるべき日本のエネルギー問題を解決できず、ひとつの方向性に固執すると、日本の産業国際競争力が損なわれる可能性もある。

(1) 低炭素化社会実現のためのエネルギー供給・貯蔵技術の課題と展望

ここでは現在最も関心の高いエネルギー供給・貯蔵技術でかつ実用に供されている主なものに焦点を当てた。火力発電の一層の高効率化、太陽発電、燃料電池、エネルギー貯蔵の抜本的な高性能化、低廉化などが課題である。なお、原子力発電と再生可能エネルギーである水力・風力・地熱発電等については、東日本大震災対策委員会エネルギー政策の選択肢分科会の提言でも触れており、また単に材料開発のみでなく環境保全等の問題も関係しているため、本報告では言及しない。

① 火力発電の課題と展望

エネルギー源のほとんどを輸入に頼る日本においては発電などのエネルギー供給技術を徹底的に効率化することが最も重要である。引用資料①は火力発電の効率化の歴史を示す。1900年以降の火力発電は主として蒸気タービンが担っており、その効率を鋭意向上させてきた。高効率化は地球温暖化の防止という世界的な取組の中でより重要性を増している。さらに2011年3月の東日本大震災により原子力発電の不確定な状態が現実を生じており、火力発電の高効率化を緊急に進める必要がある。

ア 第1世代—蒸気タービンの時代

1880年代にParsons（英）によって開発された軸流多段蒸気タービンはその高効率性・高信頼性・高経済性によりたちまち火力発電の中心となり、1900年代初頭から現在の2000年迄約100年にわたって火力発電の中心をなしている。蒸気タービンの入口圧力・温度を上げることにより、熱効率は確実に向上して来た。しかし蒸気圧力250気圧、蒸気温度600℃に到達した現在は、ほぼ飽和状態になっている。

これは鉄系の材料の耐高温限界に近付いているためである。

イ 第2世代—ダブル複合発電の時代

1990年頃から天然ガスを使った新しい高効率発電技術が急速に進展して来た。これはガスタービンでまず発電し、まだ温度の高いガスタービンの排気ガスで蒸気を発生させ蒸気タービンを廻す複合発電方式（コンバインドサイクル）であり、ダブル複合発電と呼ばれている。

この天然ガス複合発電はガスタービンの入口温度を上昇させると共に効率が上昇する。当初はガスタービン入口温度が1000℃程度で複合発電の効率も41%程度（高位発熱量基準正味熱効率）であった。しかし、その後入口温度1300℃が達成され49%、1500℃で53%と着実に効率が向上し、現在は1600℃で54%の効率が達成されようとしている。第1世代の発電効率41%程度に対して大幅な効率向上が可能である。

この方式を石炭にも適用したものが石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）である（引用資料②）。これは、石炭を粉砕して高温でガス化し、ガス精製装置にて有害物・不純物を取除いた後、これを燃料としてガスタービンで発電し、その排ガスで蒸気タービンを廻すことにより、従来の石炭複合発電所より効率を20%も向上させ、CO₂の発生量を20%減じることとなる。このIGCCは株式会社クリーンコールパワー研究所（電力10社が出資）が建設した25万kWの実証機が2008年より運転を開始し、世界最高の効率と耐久性・信頼性を確立している。今後建設される石炭火力はこのIGCCが中心になると考えられる。

ウ 第3世代—トリプル複合発電

究極の高効率発電がトリプル複合発電（引用資料③）である。これはまず1000℃で作動する高温型燃料電池（例えば固体酸化物型燃料電池SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）で半分近い発電を行い、その約1000℃の高温排気ガスでガスタービンを廻し、さらにその排気の熱で蒸気を発生させ蒸気タービンを廻す。燃料の持つエネルギーを高温型燃料電池→ガスタービン→蒸気タービンの3つの主要要素を用いて段階的に発電を行うため、トリプル複合発電と呼ばれ、極めて高い熱効率が実現可能であり、天然ガス焚で65%、石炭焚で55%の超高効率の実現が可能である。

2010年6月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、原子力の比率を50%に増やし、太陽光・風力・水力などの再生可能エネルギーを10%から20%に倍増する一方、火力は65%から35%に大幅に減少すると想定されていた。

今後、原子力の比率の増加はもとより現状維持もできない場合、不足分は再生可能エネルギーでは直ちには届かず、火力に頼るシナリオが現実的になる。CO₂排出量を下げるためには、上記の技術革新により火力発電の大幅な燃料削減が不可欠である。

エ 発電用材料の信頼性と安定性の確保

従来の蒸気タービンは比較的安価な鉄系耐熱材料を使用しているが、その耐高温性が限界にきており、これ以上の高温にしようとするとなickelベースの合金を大量に使用しなければならない。このような高温材料は 10 万時間クリープ破壊応力をもとに許容応力を決めるので、基礎データの取得だけでも 11 年を要する長期的な取り組みが必要となる。

またダブル複合発電ではガスタービンの入口ガス温度の上昇が効率向上に大きく寄与している。この場合の材料は Ni ベースの合金（超合金）であるが、燃焼温度を 1000°C から 1500°C に上昇できたのは、超合金の合金組成探索と二相組織制御による耐クリープ特性改善もあるが、精密鋳造技術の改善による空気または蒸気によるタービン翼冷却技術と翼表面への熱遮蔽コーティング素材・技術開発の寄与が大きい。

第3世代のトリプル複合発電の中核をなす高温型燃料電池として最も期待されている SOFC では、電解質がジルコニアセラミックスであり、これを燃料極、空気極で挟む3層を貼り合せた複層セラミックスであり、熱膨張率が耐久性にも大きく影響する。また性能向上のためには各層間における電子やイオンの移動を最適化する必要がある。

このように世代を問わず効率向上の成否は実は材料科学の進展にかかっており、その重要性は強調され過ぎることはない。

② 太陽光発電の課題と展望

日本ではこれからの再生可能エネルギーの柱を太陽光発電においており、2011年5月末のG8サミットで菅首相は2020年までに1000万戸に太陽光パネルを設置すると発表した。これは約3500万kWの設備容量に匹敵し、極めて意欲的な目標である。太陽光発電は可動部分も無く、静かで極めて信頼性の高い発電設備であるが、致命的な欠点は発電効率の低さと年間平均設備利用率の低さである。年間平均設備利用率は現在12%程度であるが、これは定格1000kWでも年間を通しての能力は120kWしかないとを意味する（これは昼間のみの発電であり、しかも曇りや雨だと日中でも大きく減少することによる）。年間平均設備利用率がこのように低いことが、火力発電に対し発電原価が大幅に高い最大の要因となっている（現在46円/kWh程度）。

近年、太陽光発電パネルのメガソーラ用では、集光との組み合わせで高効率化、低廉化を目指す多接合型の研究開発が盛んになっている。また、主に家庭用などの薄膜型では、低廉化を目指し、非集光で色素増感型、有機薄膜、量子ドット型などの研究開発が行われている。

また材料としても Si 以外の材料を使用する CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide) 型等が開発され、GaAs 型の研究開発も行われている。

太陽光発電は夜間稼働せず、また日本のようなモンスーン気候ではその発電力が日々一定しないことが、主力電力供給源としての普及の障害となっている。これを解

決するためには蓄電用材料・技術の飛躍的改善が必須である。

③ 燃料電池の開発の課題と展望

引用資料④は各種燃料電池を整理している。ここ 10 年くらい固体高分子(ポリマー)電解質を用いる水素-酸素燃料電池が主として自動車用や家庭用として大きく取り上げられて来た。この場合燃料である水素 (H_2) やメタノールなどにそれぞれ固有の課題がある。 H_2 の課題については後述する。

メタノールなどの液体燃料を用いることによって安全性の向上や輸送経費の低下が期待できるが、反応効率が低い、性能低下が大きいといった問題があり、燃料極の電極触媒の開発が必要である。特に現在触媒として使われている Pt は高価であり、資源量も少ないことから貴金属フリー触媒の開発が求められる。家庭用では発電ロスで生じた廃熱を用いて湯を沸かすことで全体の効率を上げているが、作動温度が $80^{\circ}C$ 程度と低いため、動力を取り出すことはできず、自動車用では廃熱を効率向上に使えない。

一方、SOFC はより高温で作動するため、電極反応速度は大きく、触媒の問題は比較的少ない。上述の第 3 世代トリプル複合発電により高効率発電が実現できる。このように SOFC は今後の燃料電池研究開発の中心になると予想される。

燃料電池は内燃機関とは異なり、固体内での反応・物質移動現象を利用するものであり、材料が性能に直接影響を与える。その意味で、固体電解質、電極、セパレータなどの高性能化、長寿命化、低廉化は常に重要であり、さらにデバイスとしての健全性が求められるので、界面における諸現象の評価と理解は必須である。

④ エネルギー貯蔵技術の課題と展望

エネルギーの供給と需要には時間的ずれがあり、エネルギー貯蔵が必要である。特に太陽や風力などの再生可能エネルギーを用いる場合にはその重要性がさらに高まる。多量の電気エネルギーを直接貯蔵することは難しく、高エネルギー物質に変換して化学エネルギーとして貯蔵する方法、あるいは揚水発電などポテンシャルエネルギーとして貯蔵する方法、高圧空気や高圧熱水として貯蔵する方法などがある。この中で特に注目されているのが化学エネルギーとして貯蔵する二次電池である。高密度・高出力の二次電池が開発できれば、自動車や船などのエンジンを代替でき、現在エネルギー消費の $1/4$ を占める運輸・交通の高効率化に大きく貢献することができる他、ピークカットを目的とする定地型エネルギー貯蔵にも使える。現在リチウムイオン電池を中心に研究開発がなされているが、エネルギー密度・パワー密度・可逆性・信頼性・安全性など多くの課題がある。リチウム-空気電池などのより長期的視点に立った新電池開発、希少元素の使用を低減する元素戦略的立場に立った材料探索などが必要である。

(2) 環境調和型未普及エネルギーの課題と展望

ここでは、グリーン・イノベーションの観点から特に留意すべきと考えられる未普及

エネルギーを取り上げた。エネルギー製造にかかる基本的な学術分野は化学であり、まずその戦略的視点を確認した後、水素、人工光合成（太陽光利用）、バイオマスについて検討した。いずれも基礎現象理解を進め、社会的環境的影響を重視して、できるだけ早期に実用化することが求められる。

① グリーンケミストリーの課題と展望

グリーンケミストリー(GC)は「環境に優しい化学」もしくは「環境共生化学」と訳される。その特徴は、環境汚染物質が出てから処理する対応的管理ではなく、予め出さないように設計して技術開発する予防的管理を重視する点にある。この概念は米国で1990年代半ばに提唱され世界に広がり、日本でもグリーンサステナブルケミストリーネットワーク(GSCN)が2000年に設立された。ただし、公害と石油危機を経験した日本は、世界に先駆けて1970-80年代に、多くの優れた環境調和型化学技術を生み出している。

日本においては、GCを『設計、原料、製造法、使用法、リサイクルなどの製品の全ライフサイクルを見通した技術革新により、「人と環境の健康・安全」、「省資源・省エネルギー」などを実現する化学技術』(GSCN, 2000)、もしくは『エネルギー、資源の制約を克服して、環境との共生を図ると同時に、安全、安心で競争力のある持続可能な社会を構築するための化学技術の体系』(経産省ロードマップ)と詳細に定義され、着実に進展している。しかし、21世紀の指導原理として十分かという問題点もある。

これからのGCの第一義的課題は、予防的管理において、全体的、多面的、科学的総合評価に基礎をおくことである。現状では、局所的、一面的、情緒的判断が少なからず見受けられる。特に、『その科学技術が社会のためになっているか、あるいは、なるか?』という、科学技術の基本的倫理から捉える必要がある。地球規模の各種制約、また、今般の東日本大震災と原発事故は、科学技術と自然の関係、現実的なエネルギー・資源問題を改めて考えさせることとなった。この状況に対応しつつ、国を豊かにするイノベーションを産み出すための新しい指導原理が求められている。

これまで、GCは製造工程に重点をおいてきたが、今後は、製品やサービス、特に、市民生活に近い化学技術を重視すべきである。エネルギー・資源問題、少子高齢化問題を解決するには、おそらく生活スタイルの転換が必要となる。それには、一般市民の同意が不可欠だからである。すなわち、議論はHow to makeから、What to make、Why to makeへ視点移すべきである。

また、社会的目標の提示においては、これまでは「環境負荷低減」など否定的側面を減らすLess negativeを目指すことが多かった。これからは、生活を積極的に豊かにするMore positiveな製品、サービス、システムなどの目標提示が重要になる。しかも、環境負荷やエネルギー・資源の消費を抑えつつそれらを実現することが求められる。

従来、横軸に1人当たり平均所得を取り、縦軸に環境汚染の程度を取ると、1人当たりの所得増加につれて初めは汚染が増大し、一定レベルに達した後、やがて低下に

転ずる逆U字型の曲線（環境クズネッツ曲線）を描くことが期待されてきた。今後、環境クズネッツ曲線のUターンや環境汚染ピークカットを確実に実現することが求められる。そのためには、個別の技術改善や部品改良に甘んじることは止め、システム全体での前進を解析し、目指すアプローチが求められる。そのためには、環境負荷評価において、時間軸を持つこと、個々技術で閉じず関連技術すべてを含むように境界設定することなどが不可欠になる。ひいては、社会全体の変革、さらには、豊かさの再定義、価値観の変革に繋がっていかざるを得ない[1]。

② 水素製造・利用技術の課題と展望

H₂は電気と相補的に用いることのできる二次エネルギーである。水またはバイオマスなどの再生可能資源を原料として、小さな投入エネルギーでH₂の製造が可能になり、さらに高効率で長寿命の燃料電池によって電気エネルギーを取り出すことができれば、世界のエネルギー問題も解決できるほどの大きなインパクトを与える。

H₂は単体の分子としては地球上にほとんど存在しないため、一次エネルギーを投入して何らかの方法で製造しなくてはならない。現状ではほとんどすべてが化石資源から改質反応で製造されており、なかでもメタンからの改質が全体の半分近くを占めている。H₂製造は今後少なくとも20年間程度は、メタンを中心とする改質反応に頼らざるを得ない状況であり、改質触媒の開発は重要なテーマである。炭素析出反応の抑制、耐シンタリング性向上、貴金属フリーの高性能新規合金触媒の開発、その場改質装置に要求される小型化、負荷応答性などが重要な課題となる。エネファームとして市場投入された固体高分子形燃料電池で用いられる燃料としてのH₂は、超高純度でなければならず、H₂を高純度に精製するための技術が求められており、低エネルギーでコンパクトなプロセスを可能にする水素分離膜材料の開発も重要である。セラミックやシリカの細孔径を制御した多孔膜、多孔質支持体上にPdを被覆した複合膜、5族金属をベースとした合金膜などが研究開発対象となっている。一方で、若干の不純物の存在下でも安定に動作する触媒の開発も重要である。

H₂製造に関わり、より長期的取り組みが必要とされるのは、バイオマスを原料とする技術、太陽光を投入エネルギーに利用する技術であり、その詳細は後述する。水素分離膜の開発や触媒開発が求められている。

H₂を利用するためには、安全かつ高密度での貯蔵法の確立も必要である。金属水素化物、錯体系水素化物、吸着物質、有機液体など競合するいくつかの材料開発が活発に行われているが、基礎的な指導原理に立ち返った研究開発が必要である。高密度貯蔵、低エネルギー放出、良サイクル特性、および当然のことながら安全性など、総合的な特性が求められている。

③ 人工光合成の課題と展望

これまで人類は基本的に化石燃料をエネルギー資源として消費してきた。化石燃料の埋蔵量は人類が消費する総エネルギー量の約200年分とされている。(引用資料⑤)

ウラン燃料の埋蔵量は約 100 年分とされており、ウラン燃料を考慮しても地球には約 300 年分のエネルギー源が埋蔵されているに過ぎない。化石燃料のなかでも現代社会の最大のエネルギー基盤である石油に限定すればその埋蔵量は約 40 年とされているので、石油に代わる再生可能エネルギーの開発は喫緊の課題である。一方、太陽からは人類の消費エネルギーの約 1 万倍のエネルギーが定常的に地球に降り注いでいる。(引用資料⑥) つまり、太陽光エネルギーはほぼ無尽蔵であり、最も有望な脱化石燃料エネルギー源と言える。

ア 人工光合成による燃料生成

太陽光エネルギーの利用については電力に変換する太陽電池が当面は先行して実用化されると考えられるが、気象条件、地域、季節などによる太陽光照射の変動によるエネルギー供給の不安定性や蓄電技術の進展が必ずしも予測できないことを鑑みると、水を原料とし H_2 や CO_2 の還元生成物を生産して太陽光エネルギーを化学エネルギーの形で貯蔵し、必要な時に必要な量を取り出すことができる人工光合成(太陽光による化学燃料生産システム)が脱化石燃料として有望と考えられる。(引用資料⑦)

イ 人工光合成の現状と展望

厳密な定義としては植物の光合成を人工的に行うことが人工光合成であるが、エネルギー変換の視点からは、光エネルギーを利用して水から電子を引き抜き、その電子を利用して H_2 の発生や CO_2 の還元など高エネルギー物質を生産する反応システムを人工光合成と定義する。人工光合成にはその手法として大きく次の二つに分類できる。

ウ 半導体光触媒による人工光合成[2]

日本が誇るホンダーフジシマ効果(水中、 TiO_2 と Pt 電極を電線をつなぎ、 TiO_2 に紫外光照射すると水が分解して O_2 が発生すると共に Pt 電極から H_2 が発生する)は歴史的発見として人工光合成研究の端緒となった。(引用資料⑧) 最近では堂免、工藤等により可視光を用いた半導体触媒による人工光合成系の開発が進展しており、日本は、半導体光触媒による水の分解— H_2 発生で一貫して世界を主導している。

エ 金属錯体による人工光合成[3]

光合成色素のクロロフィルと類似の機能を発現し得る金属錯体類を用いた人工光合成が有望でありながらもその実現が疑問視される時期もあった。その最大の課題は水分子からいかにして電子を引き抜くかであった。段階的な 4 光子-4 電子酸化による水の酸化が困難であったが最近の 1 光子-2 電子酸化の発見により新展開が見られつつあり、また CO_2 の光還元反応も高効率の反応系が見出されるなど日本が世界を主導している。

④ バイオマスの課題と展望

バイオマスは再生可能エネルギーの一つとして注目されているが、利用の観点から燃料とするか化学品とするかで分けることができる。燃料としては、廃材などの直接燃焼、ガス化による H_2 の合成、液化による燃料油の合成、さらにサトウキビやトウモロコシ中の糖の発酵によるバイオエタノールの合成等が行われている。しかし、燃料利用は化学品利用よりも炭素の固定化期間が短くなってしまう。また、バイオエタノール合成により食糧と燃料の競合が起こり、食糧価格の上昇を招いたことは記憶に新しい。したがって、今後は廃棄物や未利用資源などの非可食バイオマスを化学品、たとえばプラスチックに変換するプロセスの開発が重要である（引用資料⑨）。

非可食バイオマスとしては、資源量が豊富な木材中のリグノセルロース（リグニン、セルロース、ヘミセルロース）の利用が課題となる。しかし、リグノセルロースは植物の構造保持体である細胞壁の成分であるため分解が困難であり、有効な分解法が確立されていない。リグノセルロース分解法としては、現在までに酵素法、熱化学法、触媒法などが提案されている。酵素法は、バイオリファイナリーが注目された初期から検討されているが、反応選択性は高いものの反応活性が低く、また分離再使用が困難である。超臨界・亜臨界水を用いる熱化学法では、過酷な反応条件が必要であり、反応活性は高いが生成物選択性は低い。一方、触媒法は比較的新しいバイオマス変換法であるが、分離プロセスが容易であり、反応条件の適用範囲が広いことから、有効な方法として注目され、活発に研究開発が行われている。

リグノセルロース変換では、ガス化で CO や H_2 まで完全に分解してから炭化水素やメタノールに触媒変換する方法と、モノマー単位である糖で分解を止め、糖の構造を活かして他の化合物に変換する方法の二つがある。前者は既存技術があるが、後者のためには新技術の開発が必要である。その技術要素としては、(1)リグニン、セルロース、ヘミセルロースなど各成分の効率的な分解・変換方法、(2)分解して得られたグルコース、フルフラールなどの基盤化合物の逐次変換プロセス、例えばプラスチックのモノマー合成、(3)廃材、バガス（サトウキビ搾汁後の残渣）、稲わら、海藻などのバイオマスの前処理法が挙げられる。各段階それぞれの触媒開発が求められる。さらに、リグノセルロースに既存の官能基を活かして、高耐熱性樹脂の合成など石油原料からは得られない付加価値が付与されることが希求される。

バイオマスは固体であるため収集・運搬に経費がかかることから、小規模地域での収集と利用に適している。低経費で収集・運搬が可能な外国では大規模生産も可能であろう。

(3) 省エネルギー技術開発の課題と展望

エネルギー確保技術と両輪をなすのは、製造工程や製品利用における省エネルギー化技術である。ここでは、主要な分野における省エネルギー化について検討した。対象としたのは、運輸・輸送、電力輸送、材料製造の分野である。現用技術における省エネルギー

ギー化は一定の高水準となっているが、それをさらに突破する技術開発が求められているのが共通した特徴である。

① 運輸、輸送における省エネルギー化のための材料開発

ア 運輸、輸送機器の省エネルギー化に向けて

運輸・輸送機器部門のCO₂排出量は、国内全排出量の約20%を占めており、新興国の急速なモータリゼーションの発達を加味すると、自動車の省エネルギー化は喫緊の課題である。自動車のCO₂排出量をライフサイクルで見ると、生産・使用(走行中)・廃棄時のうち、走行中の排出量の割合が70~80%と高く、CO₂削減には省燃費化が重要な鍵となる(引用資料⑩)。

イ 省燃費達成方策

省燃費化達成方策は、引用資料⑪に示すような6つの方策が挙げられるが、代表例として、車両軽量化と内燃機関(ICE: Internal Combustion Engine)の効率向上を取り上げる。

一般的に100kgの軽量化で1km程度燃費が改善されるとされており、電動車(電気自動車やハイブリッド車などの総称)に代わっても軽量化の重要性は変わらない。軽量化のために、自動車の材料構成における低密度な軽合金材料(AlおよびMg合金)や樹脂材料の占める割合は増加しているが、依然大半を占める鉄系材料の高度な複合組織制御技術による高張力鋼のさらなる適用拡大が求められる。また、期待が高まっている炭素繊維複合樹脂材料については、炭素繊維製造工程の革新等によって、高張力鋼や軽合金と競合できる大幅な低廉化が望まれる。

多くの電動車が登場する2030年でも、ICE車が大半を占めると予測され、ICEの効率向上は依然として重要な課題である。エンジン摺動部の摩擦抵抗を低減するために、材料の表面処理技術やエンジン油を含めた潤滑技術の継続的な開発が必要であり、低廉化が求められる。

ウ 電動車の拡大に伴う新たな材料開発

電動車はエネルギー効率を大幅に改善することができCO₂低減効果は大きい。電動車の主要部品である蓄電池、逆変換回路、電動機には、磁石、電力用半導体素子、絶縁材料、電極材料など、車にとって新規の材料が数多く用いられている。

電動車の高性能化や低廉化は蓄電池によるところが大きく、材料の全固体化を含めた電池構造および製造工程の革新につながる研究開発の強化が必須である。

一方、電動車の拡大により、蓄電池や電動機に用いられるレアメタルの資源問題に直面する。磁気特性や電極特性を向上させるためには、特異な物性を有するレアメタルの使用が必須であるが、放射光等を用いた高度解析や計算科学による本質的な現象解明に基づく使用量低減や代替技術の開発が不可欠である。

② 電力輸送における省エネルギー化のための材料開発[4]

基幹電力網、都市圏規模の電力網、工場や事務所、各家庭への配電網のそれぞれにおいて、エネルギー損失を最小化する技術開発が求められている。どの課題においても材料、デバイス、システムを俯瞰した研究開発が求められる。

国際的に展開すべき基幹電力網では、使用電力平滑化とエネルギー使用効率向上が同時に実現される、超巨大グリッドと分散型電源のシステム協調を裏付ける技術開発が求められる。例えば、超低損失な超伝導送電技術などへの期待が高い。

国内での省電力化、電力高効率化のために、超高速低消費電力技術や挿入損失を低減した超高周波スイッチ、高性能な電力貯蔵、突発的な電力需要に対応した超高速電源および超高性能かつ超高効率な電機エネルギー変換技術の開発などが求められる。さらには、電気機器・通信機器・情報機器の電源共通化によるスマートプラグを用いたインテリジェント電源など、次世代スマートグリッドの基礎技術開発が今後の課題である。

電力供給の末端である工場、事務所、家庭などにおいては、電化機器の省エネルギー化とともに、ネットワーク化しつつ、個々にエネルギー管理する電力エネルギーのパーソナル化が必要で、それを実現する技術開発が課題である。具体的には、エネルギーハーベスト（自然界にあるエネルギーを使った発電）システムや超高効率局所発電・貯蔵デバイス、低密度エネルギー集積電池、ハイブリッド自動車のプラグイン化および非常時電源化、超高速充電システムなどが課題である。

創エネルギー、省エネルギーの観点から、高効率太陽電池や燃料電池の開発、高効率な電力用半導体素子の開発、高効率で安価な照明用発光ダイオードの開発などが期待されている。環境負荷の小さな電動車の普及のためには、大電力化、高耐圧化とともに、高温高湿などの厳しい環境に耐える電力用半導体素子の開発が待望されている。さらに、クリーンエネルギー源としての太陽電池、風力発電などの制御系にも性能の高い電力用半導体素子が不可欠である。しかし、Si素子の作製技術は既に高度な水準にまで達しており、その性能は材料物性で決まる限界値に近づいている。そのため、SiCやGaNなどの材料による電力用半導体素子の開発が必須である。

また、個々の回路での超低電力化も求められる。現行のCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)は消費電力の増大により早晚破たんすると予想され、「beyond CMOS」として超低消費電力、超高速の基本回路素子が、特に米国で探索されており、候補としてトンネルFET(Field Effect Transistor)、スピントロニクス、グラフェン等が挙げられている。システムLSIの低消費電力化に対し、CMOSとSiフォトリソ結合や、システム待機電力をゼロにするために垂直磁化磁気トンネル接合(MTJ: Magnetic Tunnel Junction)素子の不揮発性を飛躍的に高める研究も盛んになっている(例2011年6月東北大学発表)。一方、消費電力に優れる固体デバイスを使った高密度記録では、2020年には35Zバイトの記録容量が実現されるとされており、NANDフラッシュメモリは三次元的な構造になるとされている。また、高速CPUとのデータ転送を有効に機能させるために、NANDフラッシュメモリとの間にストレージクラスメモリ(NANDフラッシュ

メモリよりも高速に動作し、価格がDRAMと同等以下の不揮発性メモリ)が必要とされている。候補となるメモリとして、抵抗変化型、相変化、原子移動型、磁気抵抗メモリ(MRAM)など超低電圧(0.4V以下)不揮発動作デバイスとその集積化基盤技術の開発が推進されている(超低電圧デバイス技術研究組合)。これら開発と並行して、微細化限界と機能向上のため、回路の三次元化が進み、熱放散や三次元ナノカーボン配線などが課題である。

③ 材料製造における省エネルギーのための技術開発

日本のエネルギー消費全体の43%が産業部門(製造業、農林水産業、鉱業、建設業の合計)、さらにその約90%が製造業で消費されているが、1973年の第一次石油ショック以降、省エネルギーが徹底され、製造業のエネルギー消費原単位は1973年に比べて2006年では44%も低減されている(引用資料⑫:2010年エネルギー白書)。日本の鉄鋼業を例にとれば、工程の連続化、副生ガス回収、廃熱回収、廃プラスチックの再資源化などを強力に推進し、エネルギー原単位は国際的に抜きん出る省エネルギー技術を開発、ほぼ100%普及している。最も即効性のある方策は、この優れた技術を国際的に普及してことである。

しかし最近では横ばいであり、さらなる省エネルギープロセスの開発が求められる。その方向性は、鉄鋼、非鉄金属、化学工業、加工業のそれぞれで革新的技術開発を進める視点と他業種、異業態間のネットワークを形成し、ネットワークとしてエネルギー・資源を最大限有効利用するシステムを構築する視点の双方の追求が求められる。

前者では、低温廃熱の有効利用、原産地での予備処理技術と組み合わせることによる日本での精製技術の低廉化、省エネルギー化、工程の更なる省略と全く新規のプロセス技術を導入することによる総工程の簡略化などが課題であり、現在も多角的な検討が行われているが、継続的な対応が鍵となる。例えば製造業全体の約1/3のエネルギーを消費している化学工業におけるエネルギー消費の約40%が蒸留操作による分離・精製によるものであり、これらのプロセスを膜分離に転換することで大幅なエネルギー削減が期待できる。実際、塩素-苛性ソーダ製造の場合、水銀法・隔膜法からのイオン交換膜法に転換することによって消費エネルギーは約43%節減された。

後者では、自分の未利用副産物が相手の有用資源となる組み合わせがあり得る。また、鉄鋼業のスラグのように、現在利用率が高いが近い将来に建設業等で需要が縮退することが予想され、新しい用途開発が緊急課題となっているものもある。銅、鉛、亜鉛はそれぞれ個別に製錬産業が発達しているが相互には連携がない。将来、電子機器類等からの「都市鉱山」プロセスをこの三つの製錬産業と結びつけると、お互いの製錬副産物を原料にして、レアメタルをはじめとするかなり多種類の有価金属元素を経済的に抽出できる可能性が高い。また、鉄鋼スラグは技術開発により、セメント原料、路盤材などに有効利用されてきたが、近年の建設需要の落ち込みと使用材料の再使用・再利用の進展に伴い、将来の需要低迷が懸念されている。そこで、鉄鋼スラグの新用途として、漁業者等との連携によって、海洋開発・海洋環境保全に利用する技

術開発が旺盛に取り組まれている。

隘路を抜けるには、国際連携も不可欠であり、また国内では国の行政は勿論地方行政との連携も不可欠となっている。また、分野を超えた専門家の連携無しには課題解決はあり得ない。

(4) グリーン・イノベーションのためのエネルギー政策の提案

① 中長期的政策：エネルギー基盤を化石資源から太陽光等の再生可能エネルギーへ転換

化石資源、特に石油の埋蔵量は約 40 年で尽きるとされている。化石資源にかわる再生可能エネルギーの開発は時間制限を伴った喫緊の課題である。かつてヨーロッパ社会では、チリ硝石の不足から肥料不足が懸念され、懸命の努力の結果、空中窒素の化学固定によるアンモニア合成 (Haber-Bosh 法：1909 年) に成功し食糧増産を果たした例があるが、化石資源にかわる再生可能エネルギーの開発は、いっそう深刻な人類史上最も切迫した課題と言える。約 40 年後までに再生可能エネルギー基盤を確立させることから逆算すれば、遅くとも 2030 年代までに社会的合意形成を目指すための、中長期的なエネルギー政策が望まれる。それは、エネルギー基盤を化石資源から再生可能エネルギーへ転換させることである。

ア 地球規模の重要課題の解決

地球規模において解決すべき多くの重要課題に、(1)エネルギー資源をどうするか？ (2)炭素資源をどうするか？ (3)二酸化炭素排出をどうするか？ (4)大気環境をはじめとして物質環境問題をいかに解決するか？などがある。これらは現代社会が立脚するエネルギー基盤に互いに深く関係しており、一方の対策をとれば他方は状況が深刻化するというトレードオフの関係にある。例えば、シェールガス (Shale gas) は頁岩 (シェール) 層から採取される天然ガスで、米国では 1990 年代から新しい天然ガス資源として重要視されるようになったが、シェールガスの利用に際しては、温室効果ガス排出量が、従来の天然ガスや石油よりも大きくなるとの指摘が学会から上がっている。同様に、メタンハイドレート (英: methane hydrate) (メタンを中心にして周囲を水分子が囲んだ形になっている包接水和物で燃える氷とも言われる) も埋蔵量も多く、二酸化炭素排出量が石油や石炭に比べ燃焼時のおよそ半分であるため、未来の有効なエネルギー源と有望視されているが、二酸化炭素排出することでは課題がある。したがって、エネルギー基盤を化石資源から太陽光等の再生可能エネルギーに転換することにより、互いのトレードオフ関係の呪縛から解放され、それぞれを独立に解決することができる。

イ 資源制約の束縛からの脱却

埋蔵量が有限な化石資源をエネルギー資源として利用する限り、持続可能性にはおのずから限界がある。最近のレアアース、レアメタルの輸出制限の事例などから

も容易に類推されるように、埋蔵量が希少になれば、あるいは政治的思惑により、化石資源の資源国確保が一挙に進む懸念がある。太陽光エネルギーが最も有望で、地域的には風力エネルギー、地熱エネルギーなどの再生可能エネルギーが、地域独占懸念から解放される道である。

ウ 平和的な安全保障への道筋

人類の歴史は、食糧の争奪、物資の争奪、資源、特にエネルギー資源の争奪による悲惨な戦争の歴史でもある。「悲惨な戦争を避ける」のに最も有効な方策は、各国、地域がそれぞれ自給可能なエネルギー資源や炭素資源を持つことである。各国は再生可能エネルギーを、電気エネルギーや、化学エネルギー（燃料）として固定化する技術を人類の英知として共有し、互いに享受し合うことで自立したエネルギー基盤を構築できる。それには、英知を競い合う知財の競争が求められる。投入したエネルギーを凌駕する出力エネルギーがより効率的かつ安価に生産する再生可能エネルギー技術開発を科学者、技術者らが不断に行い、その手法を社会に提案し続けさせる政策誘導が求められる。当然、科学者、技術者には人類の英知を共有し得る社会構築に貢献する気概と努力が求められる。

② 短中期的政策：省エネルギー・省資源・低炭素化のための社会シミュレーションモデルを構築

素材の供給は一般に大きなエネルギー消費を伴う。特に金属素材はその傾向が強い。文明社会を維持しながら、安定な経済発展とエネルギー消費抑制を達成するには、社会基盤や輸送機器などの生産時ならびに使用時のエネルギー消費の最小化が必要である。社会基盤設置や輸送機器製造を何の制限もなく行なうことが現在の地球容量から許されなくなりつつある。したがって、適正な判断のために、どのような人工物をどのように製造し、かつ運用しながら、最終的にどのように循環使用するかを概略把握できるモデルを持つ必要がある。

これまでの CO₂ 排出抑制議論は、国別、あるいは比較のあるセクターに限られる傾向が強かった。これでは、経済成長を遂げながら温暖化を抑える手法の限界に近づいている。また、多くの金属資源については環境制約および資源制約が厳しくなっている。近年理解が進んだように、一部の金属資源を得るためには一時的であっても非常に大きな直接的な環境破壊を伴うことがある。

統括的モデル構築には、具体的に将来の社会基盤や輸送機器、その他の工業製品を構成する素材とその供給、循環使用を考慮した素材使用における CO₂ 発生量、経費等を見積もるサブモデルが必要である。地球シミュレータは、多くのエネルギーモデルと連動し、温暖化に関する情報を提供してきた。しかしながら、素材供給をほとんど考慮していない。低炭素化のための新製品の開発は盛んであるが、そこでどのような新素材が使用され、どのように素材供給がなされているかが組み込まれていない。そうするとこのモデルからすると、供給制限が突然勃発し、代替材料開発が緊急課題とし

て発生することになる。

日本は産業連関表など物流統計の信頼性が極めて高いほぼ唯一の国であり、目的とするモデルを世界に先駆けて構築し、そのモデルを世界標準として提案できる素地がある。将来社会の全体構想を素材供給の立場から行なえるシミュレーションモデルを構築することは、これからの社会基盤等をどのように構築するかを合理的に考察できるツールを持つことにもなる。

③ 短期的政策：省エネルギー化のための材料開発

エネルギーをいかに有効に利用するか（省エネルギー化）、資源の有効利用（省資源化）もグリーン・イノベーションの肝要な課題である。そのために貢献する材料開発に短期的には重点化すべきである。特に、重点化すべき材料開発には以下のようなものがある。

ア 希少金属によらない高機能触媒：特定の物質を選択的かつ高速で製造するためには触媒が不可欠である。化学工業に限らず、自動車の排ガス処理や燃料電池にも必要である。しかし、現在用いられている触媒の多くには貴金属や希少金属が用いられており、使用量の低減さらには非貴金属・非希少金属触媒の開発が必要である。また、ナフサからのエチレン製造など現在は触媒を用いられていない反応に触媒を用いることで、反応温度つまり必要エネルギーの大幅低下が求められる。

イ 特定物質のみを透過する膜：分離膜の開発は人工光合成や光触媒による水分解によって生成される水素と酸素をもたらす、燃料である水素のみを取り出すためにも、また、今後世界的に不足が予想されている水の確保のためにも必要である。

ウ 高性能の断熱材料：住宅やビルでの断熱の徹底が家庭や事務所でのエネルギー使用の低下に非常に有効であり、高性能で安価な断熱材料の開発が求められている。

3 資源問題と材料

資源問題を二つの現実的な側面から捉えてみた。ここでいう資源とは金属などを中心とした材料資源とする。ひとつは、大量に資源を使う産業分野であり、大震災を受けて大きな関心を集めている社会基盤を取り上げた。もうひとつは、資源問題を技術問題に限定せず、社会的経済的視点も入れて統括的に問い直し、資源政策への提言にまとめた。対象とした資源は、現在汎用されているものに限り、その範囲内で考慮すべき問題解決の方向性を検討した。

(1) 社会基盤のグリーン化の課題と展望

土木施設・建築など社会基盤に使用される材料の総量は、重量比においては一国の資源利用総量(commodity flows)の三分の一から半分程度を占めているといわれている[5]。

コンクリートや鋼材など、現在の社会基盤に用いられている構造材料の特色については、次のように認識されている。

- 1) 通常条件での使用においては物性が安定している
- 2) 有毒物質や健康被害懸念物質の含有度は比較的低位で放りリスクは小さい
- 3) 機能発揮のために化石燃料などのエネルギーを継続的に使用する必要はない

そこで、構造物のグリーン(environmental friendly/environment conscious)化とは、構造物にかかわる資源生産性を向上させることが主要課題になると考えられる。

資源生産性を向上させる手段として、構造物が除却される際に発生する解体材を、再利用・再原料化させることも有効であり、再利用しやすい構造材料開発を含めた材料技術開発が進んでいる。本章では、機能復元性(Resiliency)を強く意識した社会基盤構造物設計そのものに立ち返った考え方を述べる。

① 構造物のグリーン化の課題と展望

通常、社会基盤に用いられる構造物の使用年数は半世紀を超える。再利用・再原料化の可能性は、構造物の作り込み方(設計計画内容)いかに左右されるだけでなく、再利用、再原料化にかかわる需給バランスやサプライチェーン、ロジスティックスの成熟度など、解体材発生地での社会経済条件にも大きく影響される。半世紀以上先の社会経済条件を予見することは、不確実性が多く非常な困難を伴う。従って、社会基盤構造物の設計生産段階で、易解体性や再利用可能性を作り込んでおくことも重要であるが、社会基盤に用いられる構造物にかかわる資源生産性をさらに向上させるためには、使用年数の伸延にも配慮すべきである。そのためには以下の二種類のアプローチが考えられる。

- 1) 物理的耐久性(durability)向上による使用年数の延伸
- 2) 機能的持続性(sustainable serviceability)向上による使用年数の延伸

物理的耐久性向上による使用年数の延伸については、コンクリート構造物の耐久性や鋼材の防食などある程度の学術的蓄積がある。さらなる学術的深化を図るとともに

学術的蓄積の実構造物への一層の適用に注力すべきである。

一方、機能的持続性向上による使用年数の延伸については、学術上も、技術上も、挑戦すべき課題が多々ある。特に、下記は重要である。

ア 災害外力に対する頑健性 (Robustness) 及び機能復元性 (Resiliency)

日本においては、地震・津波・火災・浸水など多様かつ強力な災害外力が構造物の機能的持続性を脅かす。それぞれの災害外力に対する構造物の挙動を予測するための学術的知見にはまだまだ空白域がある。また従来の技術思想では防災性を主に災害外力に対する頑健性の視点から考えてきたが、近年は、被災した後に、多くの費用時間を要せずとも機能回復ができる被害回復復元性も防災性を構成するという考え方が有力になっている、しかしながら、機能復元性を予測・評価し、その評価に基づき作り込んでいくための学術的蓄積はまだまだ不十分である

イ 要求条件の変化に対する適応性 (adaptability)

建築物などの社会基盤については、要求条件が年々変化する。そのため建築物の主たる除却要因は、物理的耐久性の欠如よりも、刻々変化する要求条件への不適合を主要因とするのが、日本では一般的である[6]。要求条件への適応性が、機能的持続性を大きく左右していることになるが、要求条件の変化に対する適応性にかかわる学術的蓄積も必ずしも十分ではない。

以上のように、社会基盤に用いられる構造物は、極めて日常的かつ広範であるにもかかわらず、その資源生産性向上を支える学術は十分には検討されておらず、研究者・技術者の一層の努力が望まれる。

② グリーン化のためのシステムインテグレーション

建築物の要求条件の変化に対する適応性 (adaptability) を考慮した設計計画手法 (open building system) がある。まず以下のように構造物を階層システムに明確に分離する。

- 1) ティッシュ: 敷地割りなど都市・街区の空間構成枠組み。保持期間 100 年以上
- 2) スケルトン: 構造体・共通設備・外周壁。使用期間 50 年以上
- 3) インフィル: 内装・各室設備などの非構造部材・部品 要求条件の変遷にあわせて更新、したがって使用期間 20 年程度まで

それぞれの階層システムを所有運営する主体は独立であり、他の階層に影響を与えず、それぞれの階層ごとに維持更新できるように作り込む手法である。

インフィルが建築物の機能的持続性に最も影響しているものの、今までの建築物では構造体などのスケルトンに手を加えないとインフィルが更新できないことも多々ある。Open Building System は、このような隘路をなくし、インフィルの更新容易性を保証することで、建築物全体の経時的カスタマイゼーション (Continuous customization over time) を容易にする。

なお、インフィルを頻繁に更新・公開し廃棄することになると、建築物にかかわる資源生産性はかえって低下してしまうことが懸念される。そこで5年程度の使用期間を想定し、インフィルを構成する内装・各室設備をリース、レンタルの対象としクロード・ループを構成することが試みられている。半世紀先の社会経済条件を予測することと異なり、5年程度先の社会経済条件を考えつつ、交換更新のためのインフィリースケルトン間のインターフェースを設定することは一定の合理性を持つと考えられる。

いずれにせよ、更新スパンを考慮して、構造物を階層システムとして作り込んでおくという Open Building System の考え方は、建築物だけではなく、構造物の機能的持続性を実現するシステムインテグレーション手法として他の社会基盤にも適用可能であろう。

(2) グリーン・イノベーションのための資源政策の提案

あらゆるものの原料である元素資源に大きな関心を払うべき世界情勢となっている。最近日常的に聴かれるようになった「レアメタル」は和製英語のカタカナ表示であり、特段の科学的定義は無い。「レアメタル」は政策上定義されており、資源エネルギー庁所管の総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル部会により31鉱種が指定されている。ここでは、希土類元素（REE）はまとめて一種類と整理されている[7]。海外では、クリティカルミネラル[8]、クリティカルマテリアル[9]などの言葉で表現されており、いずれも特段の科学的定義を持つものではない。REEについては、主要な産地である中国における輸出制限などを契機に世界規模で大きく問題視されている。その他のレアメタルについては、個別鉱種毎に実情を捉える必要があるが、価格高騰など安定供給を揺るがす状況が懸念されている。

① 資源確保の戦略

資源界ではこの20-30年の間に二つの大きな変化が見られる。一つは新材料や新機能素子に特異な性質をもつレアメタルが使われ、多様な用途が開発されたことである。もう一つは人口大国の中国、インドをはじめ途上国の急速な消費量の増加により資源枯渇が現実味を帯びてきていることである。

このような世界情勢のなかにあって、最近の尖閣諸島の事件に見られるように日本の金属資源の供給システムは脆弱である。実効性のある柔軟な対策によって日本の金属資源の安定確保を図ることは、緊急のこととなっている。しかし、過去に起こった価格高騰、資源戦略の失敗事例などを解析すると日本の戦略には時間軸の整合性が欠如しているといわざるを得ず、安定確保を重視した戦略に転換する必要がある。

具体的に0～5年先を現未来に、5～50年を近・中未来に区分すると、レアメタルとベースメタルの資源戦略は大略次のようになる。

ア 現未来（0～5年先）を見越した提案

現未来におけるレアメタルの供給障害には新素材の急激な需要増加による供給不足と人為的に作りだされる突発的な障害の二つがある。たとえば、21世紀になって携帯電話や液晶テレビの爆発的な普及により Ta（コンデンサ）や In（液晶用透明電極）の価格が一時的に5倍以上に高騰したことは、需要増加に対し新規鉱山の開発などに時間がかかり増産体制の確立が数年遅れたためである。類似した事例はほかにも多数存在する。このような時間的ずれを発生させないためには先端技術産業と資源産業が一体となった組織を作り、現未来の需要量を予め算出し、この予測に基づき鉱石から素材にいたるまでの流通にボトルネックができないような事前の準備と対策を計画しておくことが肝要である。つぎに REE をはじめ W、Bi、In、Si、Pt・Pd、Co などの資源は特定国の政策や紛争などによる人為的な障害が潜在しているので、供給先の多様化をはかり生産国による極端な偏在が起これないようにする必要がある。この場合も先端技術産業と資源産業がリスクを共有し、政治問題、経済問題を含む広範な視点から価格依存性に幅を持たせ、偏在を減少させ流通にボトルネックができないようにすることである。なお、国内的には多くの電子機器、自動車部品等にレアメタルが使用されており、その分離回収が行われている。しかし、このリサイクルは技術の問題よりも回収価格との関係もあり、いわゆる「都市鉱山」を中心とするリサイクル法整備をすべきであろう。

現未来におけるベースメタルについては、世界市場が資源メジャーにより支配されているので、日本が世界戦略に大きな影響力を与える形で参入することは困難である。したがってレアメタルとは戦略が大きく異なり、日本の先導によって世界の安定供給が考えられるような立場にはない。日本の資源技術、経済力、消費量を背景に、技術開発に専念し優秀な製錬所を育成した上で適切な価格でしかも滞りなく鉱石あるいは精鉱を提供できるようにすべきである。このような状況から資源メジャーの一部に参画、協力を深め輸入量の安定確保をはかり、また資源メジャーが対象としない中・小規模鉱山の独自開発を積極的に行い、資源確保と代替鉱物資源の製錬技術の開発等とともに、それらに従事する人材育成を目指すことである。

イ 近未来（5～50年先）を見越した提案

近・中未来におけるメタル確保はおおむねこれまでに手がけられている事柄の踏襲、促進が主体になる。新鉱床の発見による埋蔵量の増加、消費量を少なくする省資源化、代替材料の開発および実用化、リサイクル（いわゆる「都市鉱山」も含まれる）の4つである。レアメタルでは新鉱床の発見が期待されるメタルも多い。想定される需要に呼応した探査・開発計画が重要である。また省レアメタル、レアメタルを使わない代替材料の開発、リサイクルも重要で、Pt や Dy のように極端な埋蔵量の偏在から抜けだせない金属ではとくに必要である。

ベースメタルでは、鉄、ボーキサイトを除き銅、亜鉛、鉛は枯渇が心配される。これまでに枯渇した資源種はないが、発展途上国の急速な経済成長を考慮すると大

きな供給不足が予測される。低経済性のため手がつけられていない低品位鉱など資源化開発の準備が肝要である。

② 代替材料開発

代替材料は、従来材料に替わってその機能が同等もしくはより優れた新しい材料を意味する。材料開発ではより優れた機能を求めることが当然視されてきた。ところが、材料に使用される元素や化合物が環境不適合となると、機能が同等程度でも不適合物質を含まない代替材料を求めた。最近では資源制約が厳しくなり、資源制約のない代替が大きな動機になっている。原料資源供給を考慮せずに材料開発を行うことへの反省も含まれている。

代替材料を検討する場合、以下のように素材の供給状況をしっかり把握することが必要である。すなわち、どのような形でその素材が製造されているか、その資源がどのくらいの量、価格で取得できるかを把握する。また、素材供給全体を俯瞰して開発方針を決定しなくてはならない。分かりやすい例として、EUでROHS指令が発効しPbはんだが規制された際に、代替にAg、Biなどを含む新規の鉛フリーはんだが導入された事例を取り上げる。実は、Agの一部、Biのほとんどは、鉛製錬の副産物であり、もし、Pbを全く製造しなくなるとBiの供給は極めて困難になる。他に経済合理性のあるBi技術はない。現状技術体系のままでは、Biを使うためにPbを作るがPbは積んでおくという矛盾が起こる。

問題点の在処は個別異なることにも注意が必要である。近年非常に厳しい資源制約がかかっているREE、W、PGM(Platinum Group Metals)についてみよう。REE、Wに関しては、供給側の中国の事情が大きく作用しており、非常に短期的な対策が望まれている。一方PGMは本来的に非常に資源供給量が少なく、かつ資源絶対量が他の金属資源と比較しても桁外れに少ない物質である。見かけの可採年数が長いので、あまり緊急を要しないと誤解されがちであるが、性能を代替できる物質はまだ開発されていない。

材料開発は10年のオーダーで進んでいくものであり、あまり短期の対応に追われると「材料機能の発現の本質を理解する」という基本をおろそかにする危険性がある。科学の成果を直ぐに実用化する期待が強くなる傾向にある。「科学に社会性(倫理性)を求める」ことに異論ないが、あまり近視眼的に実用を意識すると「考え方の原理原則を追究し、人類に貢献する」という科学の本来の姿を失うことが危惧される。

4 グリーン・イノベーションに向けた拠点形成と人材育成のための政策提案

グリーン・イノベーションと材料に深く関連する省エネルギー、社会基盤、低炭素化社会、脱化石燃料、資源戦略の分野の各課題を解決するための拠点形成のあるべき姿、将来を託する人材像、人材育成方策はどうあるべきか。

文科省のグローバルCOEによる研究拠点形成事業は、それなりの教育面を重視した施策であり、有効であると考えられる。一方、特定の大学に集中させていることにより総花的になりがちな感がある。材料科学・工学の分野では、日本はそのレベルが国際的に認知され、先導している数少ない分野の一つである。世界的に強い材料科学・工学で、特定な分野で全国的な研究者連携をも可能にし、研究的面をも重視したグローバルな産官学共同研究拠点形成事業の実施が望まれる。課題解決型の研究を実施する拠点は、各課題に対して専門分野の垣根を越えて企業、公設機関、大学等が連携して、基礎研究、基盤研究、応用研究を行うものでなければならない。また、ここでは、教育、研究とグリーン・イノベーション課題解決が一体化した組織運営が望まれる。産官学共同研究拠点では独自の課題解決型研究を実施するとともに、高度な機器の有効に共同使用する国内外の大学、研究機関とネットワークを形成して、人類の環境、福祉の課題に取り組み、共同して問題解決することも希求される。

材料科学・工学、機械工学、土木工学、建築学、化学は社会と産業と結び付きが強く、総合工学的な面もある。したがって支える人材像としては、基礎物理、基礎化学、生命科学や計算科学の進歩を理解し、また、応用領域としての環境科学、極限材料、生命健康分野などにおける材料の重要性とその課題が解決された場合の社会的衝撃（例えばエネルギー発生、蓄積、航空宇宙、移動体、通信）を社会に、学生に提示できる人であり、そのための努力と素養は常に求められる。無論、経済・社会情勢へ関心を持つことは重要である。材料は数多ある物質のなかで社会に直接役にたつものである。よって、材料の研究者には、社会の困難の解決や夢のある社会を実現したいという高い志が要求され、そのような志を持った人材の育成が必須である。急速に変化している世界を理解し、グローバル化の重要性を認識して日常的に対応できる人材が求められている。日本が定評のある、材料工学、産業において、重要度を増した国際標準を体験熟知したグローバルリーダが養成され、国際的な人のネットワークを構築した国際人としての活躍が望まれる。

このようなグローバルな産官学共同研究拠点においては、上記の人材像の研究者の育成も重要な使命とする。優れた、日本独自の研究実施過程で、次の時代を担う若き研究者が育成されるのは自明のことである。博士号を取った若き研究者は、過去においては、本人の努力と、徒弟制度的に講座内上司に鍛えられ、育成されてきた。現在、多くの大学では、講座は少なくなり、教授、準教授は独立しているゆるい縛りの講座に移行して、運営されているのが実態であろう。このような変化に即応した人材育成プログラムを作り、助教、ポスドクを育成する必要がある。英語力はもちろん、より広い、深い教養を身につけ、将来産業界でも受け入れられる人材の育成プログラムの義務化やメンター制度、教育経験や研究室運営体験機会の設定など工夫が肝要である。また、研究環境充実のためには、機

器の操作に伴い、大学院生、若きテクニシャンの育成も極めて重要であり、彼らのキャリアパスにも十分配慮してこそ真の人材育成になる。

<参考文献>

- [1] 御園生誠, 松本英之, 野尻直弘, 『新時代の GSC 戦略』 化学工業日報社, 2011
- [2] A. Fujishima, K. Honda, *Nature*, 238, 37 (1972) :K, Maeda, K. Teramura, D. Lu, T. Takata, N. Saito, Y. Inoue, K. Domen, *Nature*, 440, 295 (2006).
- [3] 井上晴夫、化学、66, 12 (2011).
- [4] 平成 22 年 4 月 5 日 日本学術会議電気電子工学委員会 「電気電子工学分野の展望—変革期の電気電子工学、今後の展開に向けて—
- [5] 例えば、Adriaanse, Albert et al., *Resource flows: the material basis of industrial economies*. Washington, DC: World Resources Institute, 1997
- [6] 例えば、吉田倬郎, 加藤裕久, 小松幸夫, 三橋博巳, 飯田恭一, 野城智也, 建物の取壊し理由に関する調査研究, 日本建築学会第八回建築生産と管理技術シンポジウム論文集, 日本建築学会, vol. 8, PP359-366, 1992. 7
- [7] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 資料 ③ 『レアメタル備蓄データ集 (31 鉱種)』 (2005)
http://www.jogmec.go.jp/mric_web/organization/japan/g3/shiryo_haihu_page/haihu.html
- [8] <http://www.energy.gov/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf> Critical Materials Strategy Summary, U.S. Department of Energy, 2010
- [9] http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf Critical raw materials for the EU, Version of 30 July 2010

＜参考資料＞ 審議経過

日本学術会議日本学術会議材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会審議経過

平成22年

10月 4日 日本学術会議幹事会（第107回）
分科会設置、委員決定

11月24日 分科会（第1回）
審議目的、今後の進め方について

平成23年

2月17日 分科会（第2回）
グリーン・イノベーションの材料に関する話題提供、シンポジウム検討

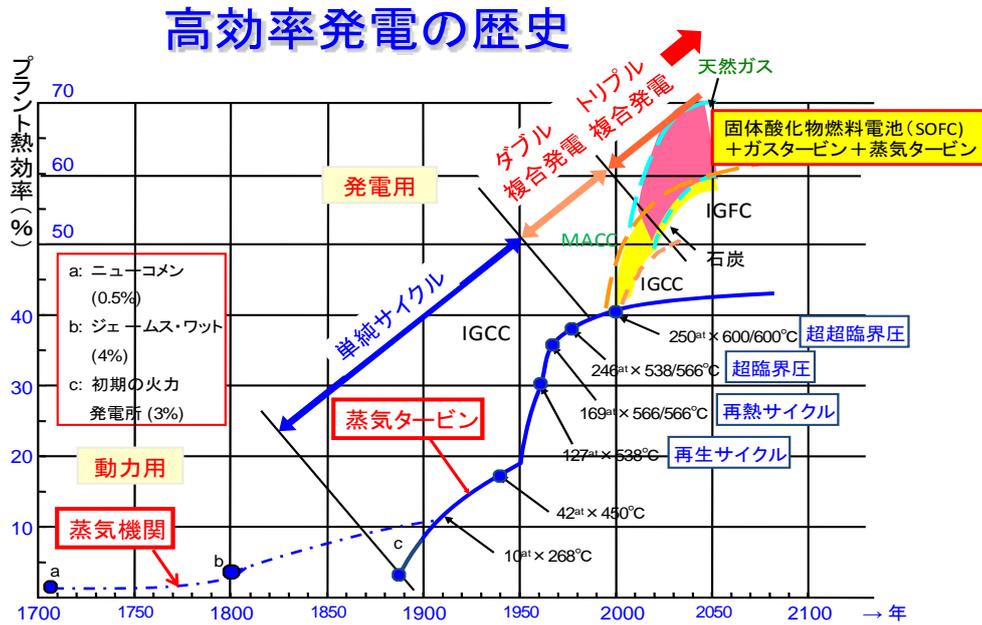
5月 9日 分科会（第3回）
報告書の目次構成の検討、グリーン・イノベーションの材料に関する話題提供、材料研究課題の議論

6月 1日 分科会（第4回）
報告書案（目次、内容、執筆担当者等）の検討

9月 1日 日本学術会議幹事会（第133回）
グリーン・イノベーションの材料分科会報告「グリーン・イノベーション実現に向けての研究課題と展望－材料研究を中心として－」について承認

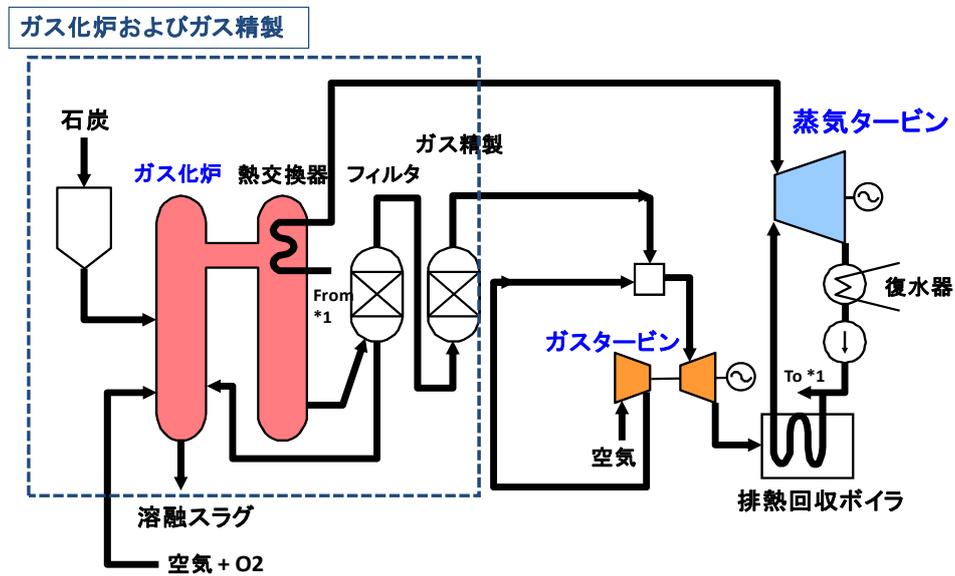
<引用資料>

◆引用資料① 火力発電の高効率化の歴史



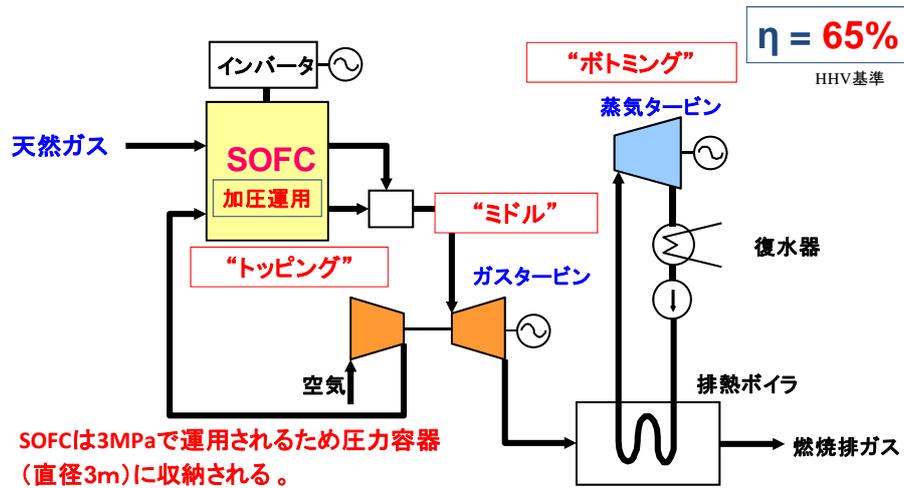
出典:火力原子力発電 No. 570 Vol. 55 (2004年3月)

◆引用資料② 石炭ガス化複合発電



出典: 技術総合誌 OHM 第98巻 第7号 (2011年7月)

◆引用資料③ トリプル複合発電



SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (固体酸化物形燃料電池)

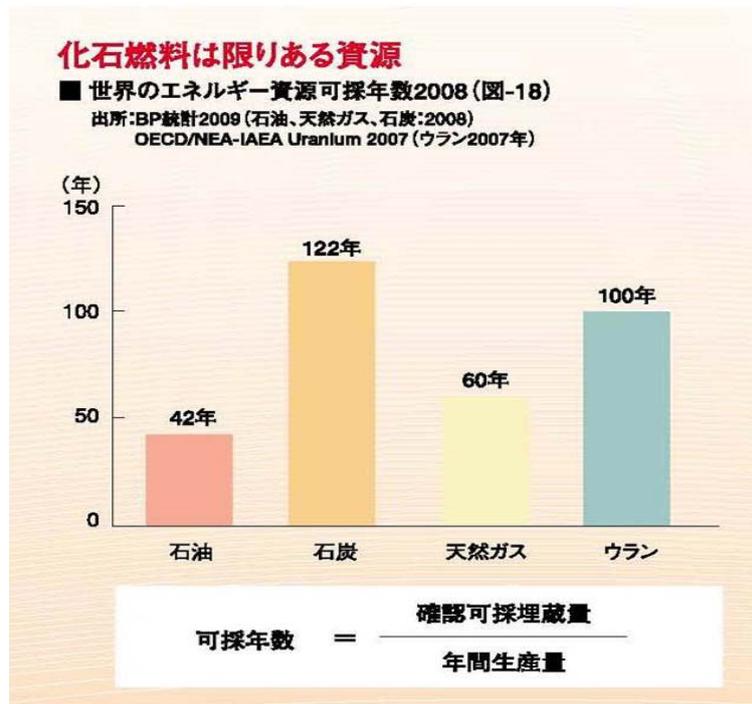
出典: 東京大学 先端エネルギー変換工学寄付研究部門
第5回技術フォーラム 講演資料集 (2011年5月)

◆引用資料④ 燃料電池の種類

	固体高分子(ポリマー)電解質型 PEFC, PEM	りん酸型 PAFC	熔融炭酸塩型 MCFC	固体酸化物型 SOFC
電解質	固体 (ポリマー)	液体 (濃りん酸)	液体 (アルカリ溶融塩)	固体 (セラミックス)
電解質中 移動イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
作動温度	~80°C	~180°C	~650°C	~1000°C
使用可能燃料	H ₂	H ₂	CO H ₂	CO H ₂ CH ₄ 等

出典: 本報告書のために作成

◆引用資料⑤ エネルギー資源可採年数



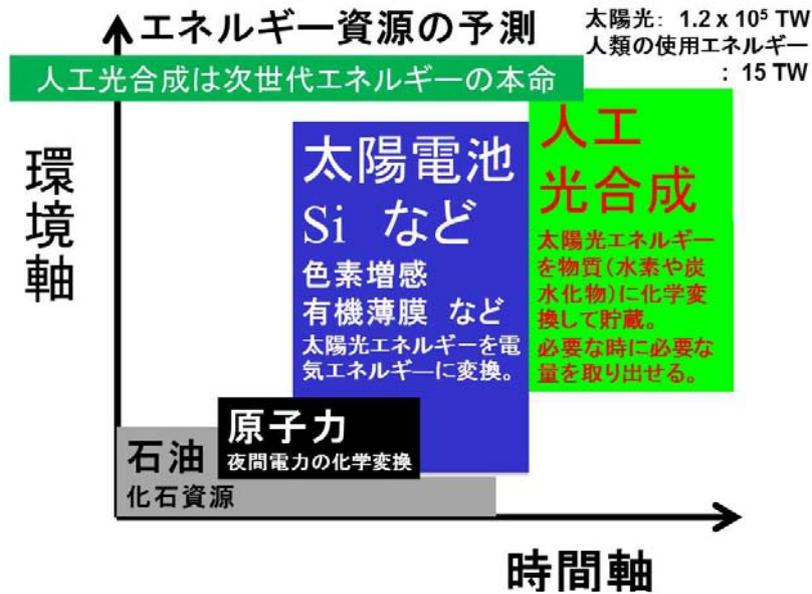
出所:BP 統計 2009 (石油、天然ガス、石炭:2008)
 OECD/NEA-IAEA Uranium 2007 (ウラン 2007 年)

◆引用資料⑥ エネルギー量の比較

太陽光エネルギー (J/Year)	
• 地球表面への照射量	3.0 x 10 ²⁴ 1x10⁴
• 人類のエネルギー消費量	3.0 x 10 ²⁰ 1
• 光合成量(地球の総量)	3.0 x 10 ²¹ 10
• 全化石資源量	太陽光10日分 300

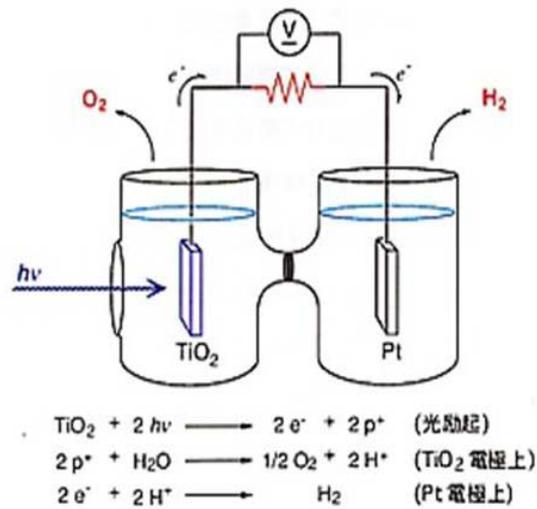
出典: 本報告書のために作成

◆引用資料⑦ エネルギー資源の予測



出典: 本報告書のために作成

◆引用資料⑧ ホンダーフジシマ効果による水の光分解



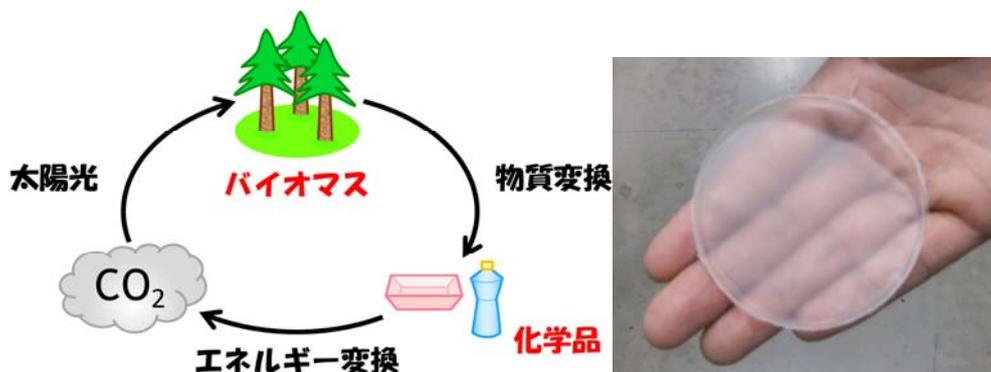
ホンダーフジシマ効果による水の光分解

出典: 工業化学雑誌, 72, 108 (1969).

Bull. Chem. Soc. Jpn., 44, 1148 (1971).

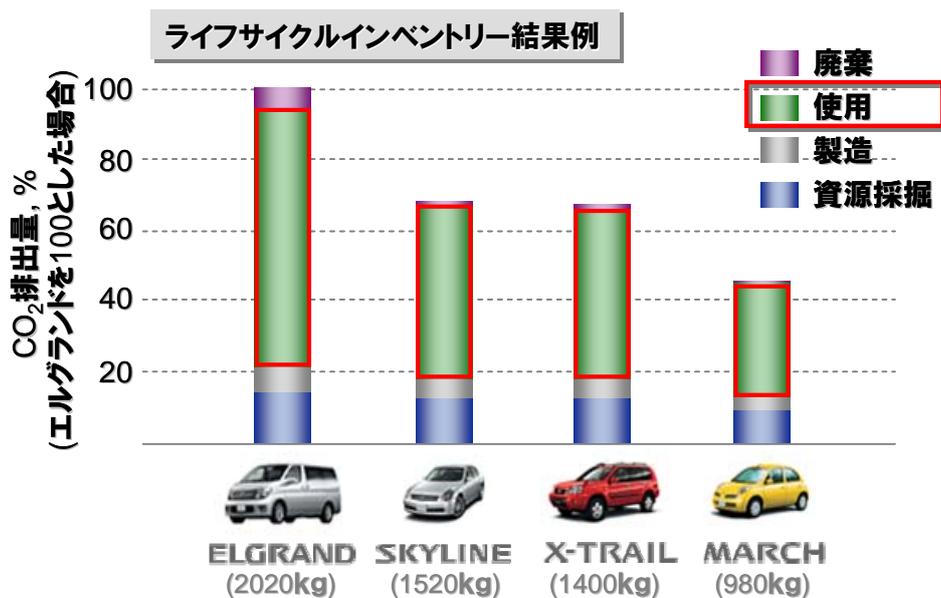
Nature, 238, 37 (1972).

◆引用資料⑨ バイオマスの化学品利用による炭素循環システムとバイオプラスチック



出典：本報告書のために作成

◆引用資料⑩ 自動車ライフサイクル全般におけるCO₂排出の内訳



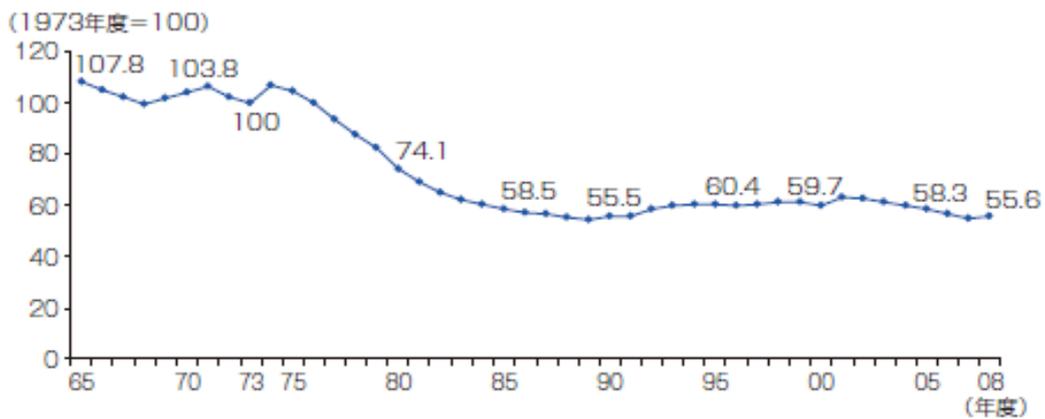
出典：社団法人自動車技術会 2010年春季大会「自動車材料の新たな挑戦～サステイナブルモビリティの実現に向けて～」フォーラムにおける「サステイナブルな自動車用材料の開発動向」講演資料より（2011年5月20日）

◆引用資料⑪ 省燃費達成方策



出典: 社団法人自動車技術会 2010年春季大会「自動車材料の新たな挑戦～サステイナブルモビリティの実現に向けて～」フォーラムにおける「サステイナブルな自動車用材料の開発動向」講演資料より (2011年5月20日)

◆引用資料⑫ 製造業のエネルギー消費原単位の推移 (1973年度を100として比較)



出典: 「2010年エネルギー白書」(経済産業省資源エネルギー庁)、第212-1-3
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2010energyhtml/2-1-2.html>

◆引用資料⑬

日本学術会議シンポジウム概要

『グリーン・イノベーション実現に向けての材料研究課題と展望』

－開催趣旨－

第4期科学基本計画におけるグリーン・イノベーションを実現するための材料における課題について、材料を作る側、使う側双方の視点で、関連する科学技術者が意見を交わして、グリーン・イノベーションのためのボトルネックとなる材料課題を抽出する。同時に、国民・社会に材料の重要性をアピールし、若手人材育成に結びつけ、今後の指針を得ることを目的とする。

日本学術会議 材料工学、総合工学、機械工学、土木工学・建築学
化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会
委員長 馬越佑吉

－開催概要－

日時：平成23年6月1日（水）13時30分から17時30分

会場：日本学術会議 講堂

主催：日本学術会議 材料工学委員会、総合工学委員会、機械工学委員会、土木工学・建築学委員会、化学委員会合同グリーン・イノベーションの材料分科会

共催：材料連合協議会，材料戦略委員会

－講演概要－

開会の辞：日本学術会議グリーン・イノベーションの材料分科会 委員長

大阪大学 名誉教授（日本学術会議 会員） 馬越 佑吉

講演：

13:45-14:15 金属資源戦略とそのボトルネック

東北大学多元物質科学研究所 教授（日本学術会議 連携会員）中村 崇・・・3

14:15-14:45 エネルギー供給技術の展望と課題

東京大学生産技術研究所 特任教授 金子 祥三・・・8

14:45-15:15 社会基盤のグリーン化：材料とシステムをどう繋ぐか

東京大学生産技術研究所 所長・教授（日本学術会議 連携会員）野城 智也・・・16

15:15-15:45 21世紀の化学技術戦略：グリーンケミストリーの展望と課題

日本化学連合会長、東京大学 名誉教授、（日本学術会議 連携会員）御園生 誠・・・22

15:45-16:15 省エネルギーの展望とそのボトルネック

東京大学大学院工学系研究科 教授（日本学術会議 連携会員）足立 芳寛・・・27

（休憩）

パネル討論：

16:30-17:15 ーグローバル視点での日本がとるべき長期戦略ー・・・・・・・32

進行役：物質・材料研究機構 中核機能部門長、ナノ材料科学環境拠点マネージャー

（日本学術会議 連携会員）長井 寿

パネリスト：

芝浦工業大学 学長（日本学術会議 会員） 柘植 綾夫

科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 金子 直哉

トヨタ自動車株式会社 電池研究部長 射場 英紀

文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 環境科学技術推進官 福井 俊英

閉会の辞：東京大学 副学長・理事（日本学術会議 会員）前田 正史

講演「金属資源戦略とそのボトルネック」

東北大学多元物質科学研究所 教授 中村 崇

金属資源価格の高騰は一時急落したものの、全体として見れば高騰を続けている。金属資源供給に不安がある。金属資源確保のための現在のボトルネックとして大きく3つあげることができる。まず従来の OECD 諸国以外の国の経済的発展への離陸、資源メジャーの台頭、一部レアメタルの偏在である。

ボトルネック

少し前のデータであるが、経済的発展でいえば、中国の主要資源消費量が圧倒的に伸びており、世界経済における BRICs 諸国の台頭も著しいことがこのグラフからわかる。BRICs は世界人口の約 42% (2007 年) を占めており、BRICs 諸国は離陸した、といえる。離陸すると簡単には着陸できず、ということは金属資源の需要が簡単にはなくならないということである。

これは、アルミニウムや粗銅生産量の長期推移を見ても、圧倒的に需要が伸びたことは明らかである。金属素材の大きいところはインフラに使用され、生活が豊かになったことを示す。

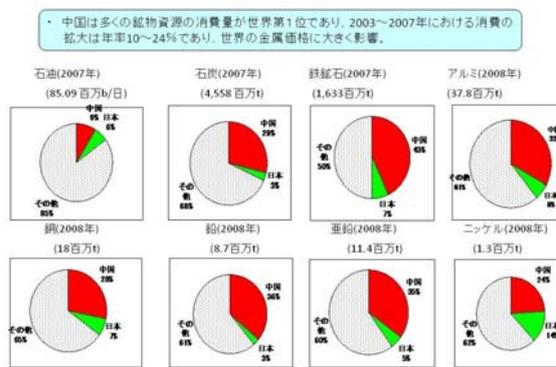
2 つ目のボトルネックは「資源メジャーの台頭」である。

2008 年の世界の主要企業の時価総額である

が、世界的にはエネルギー産業が大きい。石油メジャーの規模が大きく、非鉄メジャーを大きく越える。日本最大の企業であるトヨタは非鉄メジャーと同規模であり、残念ながら日本の素材産業系は図のような状況であるが、世界と戦っていかなければいけない。

世界の銅鉱石生産量 (2009 年) を見ても、CODELCO、Freeport McMoran、BHP Billiton、

中国と日本の主要資源消費量 (2008 年)

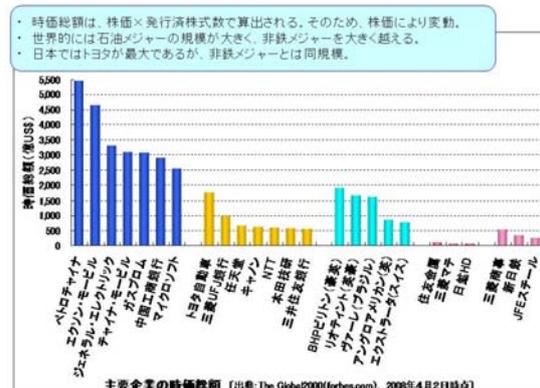


世界経済におけるBRICs諸国の台頭

BRICs: Brazil, Russia, India, China
 - 米 Goldman Sachs 証券が、2003年10月に発表したレポート「Dreaming With BRICs: The Path to 2050, Goldman Sachs Global Paper, October 2003」の中で初めて登場した造語。
 - 世界の人口の約42% (約28億人、2007年)、GDPの約13% (約7兆ドル、2007年)、国土面積の約28%を占める。BRICsは原油でこそ輸出ポジションにあるが、世界消費量の36%を占めており、輸入ポジション。

	GDP (Year 2007)	Population (Year 2007)	Land (Year 2007)	GDP Growth (Year 2008)	Crude Oil (2007) Production	Crude Oil (2007) Consumption	Copper (2007) Production	Copper (2007) Consumption
Brazil	2.4%	2.9%	8.3%	5.2%	2.3%	n/a	1.3%	1.8%
Russia	2.4%	2.1%	12.8%	7.0%	12.6%	3.2%	5.0%	3.8%
India	2.0%	17.5%	2.4%	7.9%	nil	n/a	0.2%	2.9%
China	6.0%	19.9%	7.1%	9.7%	4.8%	9.3%	5.4%	27.0%
BRICs	12.8%	42.4%	28.4%	7.5%	19.7%	12.5%	11.9%	35.5%
World	\$ 54,312 billion	6,871 million	136 x 10 ⁶ km ²	3.7%	81 x 10 ⁶ b/d	85 x 10 ⁶ b/d	15 x 10 ⁶ t	18 x 10 ⁶ t

世界の主要企業の時価総額 (2008年4月)



Xstrata、Rio Tinto、Anglo Americanなどがかなりしっかり押さえているため日本はなかなか手を出せない。最近、住友金属鉱山がチリで住商と組んでかなりの権益をとったが、自給率から考えると画期的に改善されたわけではない。しかも契約された銅鉱山の銅品位は既に0.5%を切っている。銅資源に関してはそういうところまで手をつけざるを得ない状況になっているということである。

資源の供給元を列記する。

鉄鋼：BHP ビリトン、リオティント

アルミニウム：アルコア、アルキャン（リオティント）、ロシア、中国

銅：フリーポートマクレラン、コデルコ、BHP ビリトン、エクストラージャ

タングステン：中国、カザフスタン、ロシア

RE：中国

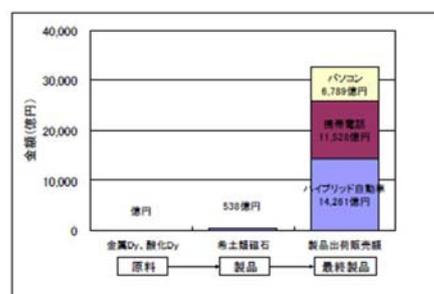
白金：アングロアメリカン、インパラ、ロンミン、ロシア

このようにメジャーと国営がしっかり押さえているという状況で、はっきり言うとなかなか手が出せない状況にある。

ボトルネックの3番目は「一部レアメタルの偏在」、希土類が中国に偏在していることである。中国はEL(輸出許可)枠を設け、これが利権となった形で取引されているため、とんでもない価格高騰が起こる。

ただ、ここにジスプロシウム含有製品及び最終製品の国内市場(ネオジム磁石)を示している。供給に関してしっかり押さえ込まれているため大変なのであるが、素材が高くなったといっても、最終製品の売り上げと比較すると随分違う。これを高いと見るのか高くないと見るのかは非常に難しいところである。

ジスプロシウム含有製品及び最終製品の国内市場(ネオジム磁石)
出典 電子情報技術産業協会(JEITA)HP・機械統計
注 製品は希土類磁石(Sm-Co系、Nd-Fe-B系、その他)のデータ



独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 委託
「希少金属代替材料開発に関する最新情報収集検討」報告書

確保戦略

これは中国鉱物資源政策の動向である。

中国は資源に関しては非常にシビアであり、外資を入れていいところと絶対入れないところを明確に打ち出している。しかも、中国はもはや資源国ではなく、資源輸入国である。持っている資源は希土類、タングステン、モリブデン、アンチモンあたりなので、そこは外貨参入を

中国鉱物資源政策の動向

2006年3月に承認された第11次5ヵ年計画(2006~2010年)の概要は以下の通り。

- ① 素材産業の構造及び配置の調整
- ② 西部地域大開発の推進
- ③ 資源節約型・環境配慮型社会の実現

中国の鉱物資源政策の基本的方向

- ① 国内鉱物資源開発に関する外資導入(2007/10.31外資によるレアメタル開発禁止)
 - ・ 外資参入を奨励する鉱種(国内で消費が激えない石油、天然ガス、銅、亜鉛、ニッケル等)
 - ・ 外資を規制する鉱種(国内で生産過剰の希土類、タングステン、モリブデン、アンチモン等)
 - ・ ウラニウムは商業目的の採掘・開発は禁止
- ② 中国企業による海外資源開発投資の積極的展開
- ③ リサイクル資源活用推進
 - ・ 30万t以上の再生銅・再生アルミ・再生鉛のモデル企業建設
 - ・ 廃家電回収モデル基地建設
- ④ 鋼製錬業への投資抑制と中小製錬業の整理・縮小
- ⑤ 国内資源の国内での活用を振興
 - ・ 鋼の委託加工貿易を全面禁止
 - ・ 輸出関税引き上げ
 - ・ 錳石、銅、ニッケル等非鉄金属11品目、原油や石炭等最大15%の課税
 - ・ 2008年のレアメタル輸出割当の削減



「西部大開発」対象地域

規制している。

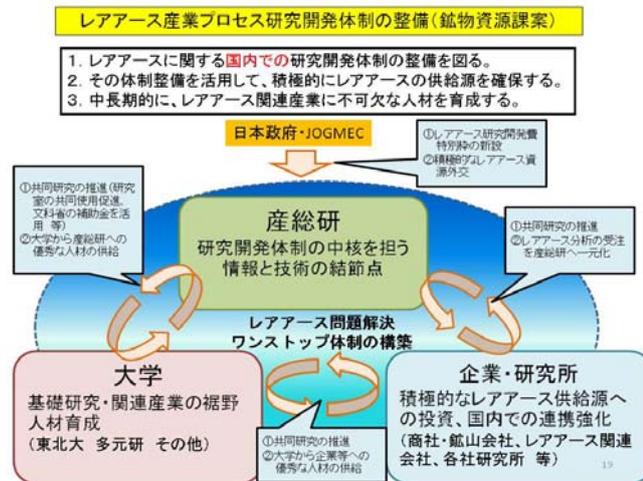
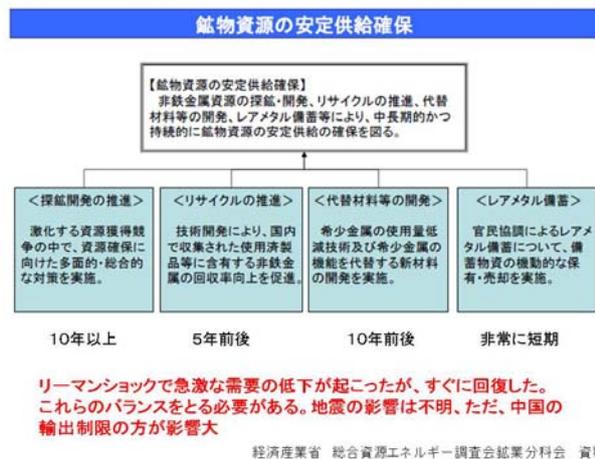
それから、驚いたことに“都市鉱山”という言葉が中国語に訳され、7つの拠点をつかって、ダイナミックに資源循環を行うという政策が打たれている。中国は国家命令でやろうと思えばできるため、日本がリサイクルしているといっても、循環使用に関して中国に圧倒的に負けるだろう。

経済産業省総合資源エネルギー調査会の鉱業分科会で議論するときに使われた日本の鉱物資源の安定供給確保の4つの柱である。

探鉱開発（10年以上）、リサイクル推進（5年前後）、代替材料等の開発（10年前後）、レアメタル備蓄（非常に短期）というように時間軸がそれぞれ違って、それに対応するというきれいなまとめをしているが、なかなか厳しい状況である。

そのうちの一つの施策として考えられているのが、「レアアース産業プロセス研究開発体制の整備（鉱物資源課案）」である。

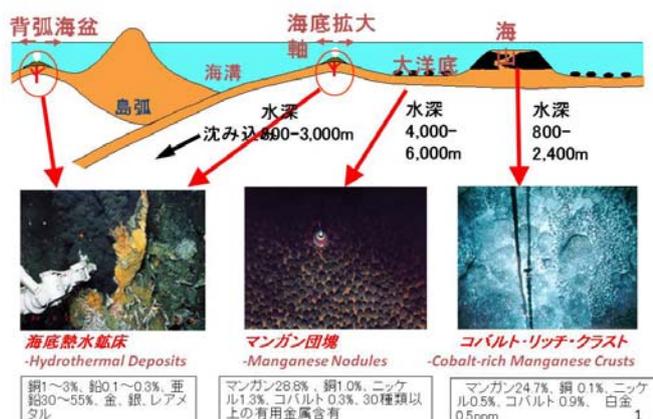
希土類に関して、日本政府がある程度お金を出して、産総研をベースに希土類の問題をワンストップで解決しようというものである。希土類の一次資源確保を考える場合、放射性元素のトリウムとウランをどう処理するかということが課題となる。それらも含めて、人材育成からすべてをトータルでやらないととても資源は取りにいけないということである。



深海底の3種の鉱物資源

もう一つは、深海底にある国内資源、海底熱水鉱床、マンガン団塊、コバルト・リッチ・クラストである。

これまでアンタッチャブルだった部分であるが、今、国の施策として大きく力を入れている。これが確保できれば状況は随分変わるかもしれないが、相



当の科学技術の進歩と資源価格の高騰がないとバランスはとれない。

海底熱水鉱床に係る開発計画（ロードマップ）では、現在、第1期中間評価（試験候補海域選定）中であるが、次の団塊のパイロットプラント建設・試験になるとかなり大規模な開発なり、これは企業中心となる。日本のEEZ(排他的経済水域)という、また別な意味の非常に微妙な部分とかなり絡んでおり、今、検討されている。

それから、やはりリサイクルを考えなければいけないのではないかとということである。サプライチェーンを考えた場合のクリティカル回収対象である。

日本ではリサイクルについてかなりされていると思うが、レアメタルに関して言うとそのほど大きなインパクトがないことと、車、家電、産業機器、建設物の解体を含めて循環使用をどう考えるか、ということである。残念ながら、日本はすべて個別にリサイクル法ができています。そのため、これをまとめる社会システムがなかなかできにくい。これが非常に大きなボトルネックになっている。

日本では、金属素材の循環使用として、鉄・アルミのリサイクルが長い歴史によって確立されている。そこからレアメタルとか非鉄系も出るが、その回収はなかなかうまくいっていない。

この写真は初代プリウスモーターの解体作業である。

モーター部分を取り外すだけでもかなり大変である。外側は銅線にケイ素鋼板、内部はネオ・鉄・ボロンでディスペロが入っている。初代のため、けっこうな量のディスペロシウムが使われている。

しかし、これを見た瞬間、私が思ったのは経済合理性があってリサイクルできるのはたぶん銅であるということである。ケイ素鋼板は素晴らしい技術をつぎ込んでも鉄であり、なかなか難しい。ネオ・鉄・ボロンを取ろうとすると消磁をしなければいけない。

サプライチェーンを考えた場合のクリティカルメタル回収対象

- | | |
|----------|---------------|
| • 自動車 | 自動車リサイクル法 |
| • 家電 | 家電リサイクル法 |
| • 小型電子機器 | 現在収集プロジェクト実施中 |
| • 産業機械 | 産業廃棄物として回収 |
| 情報機器 | サーバーなど |
| 医療機器 | MRIなど |
| 鉄道 | 新幹線など |
| • 建設物 | 建設資材リサイクル法 |

プリウスモーターの解体作業



モーター取外し作業(コイル部) モーター取外し作業(コイル部) モーター(コイル部)



モーター(軸受+磁石部) モーター(軸受+磁石部) 遊星ギア+モーター解体写真

プリウスモーターの解体作業



ガスバーナーによる消磁 電磁鋼板切断(内装Nd磁石) Nd磁石 電磁鋼板切断(内装Nd磁石)



Nd磁石(71g×16枚) 切断電磁鋼板+Nd磁石

まとめ

グリーン・イノベーションというとき、CO₂が本当に温暖化の犯人かどうかは何ともいえないが、CO₂の発生抑制をしなければいけない。CO₂排出の多い素材産業では製造プロセスでの削減ポテンシャルは大きく、素材は製品使用時のエネルギー消費削減にも影響は極めて大きい。

将来、いろいろなものを作るときにはいろいろな材料が必要である。それらがどのような素材で、どのように作られていくというシミュレーションを行い、生産量や資源の供給可能性などを数値化し、推定ができるツールを持つことが大きな意味を持つと思う。

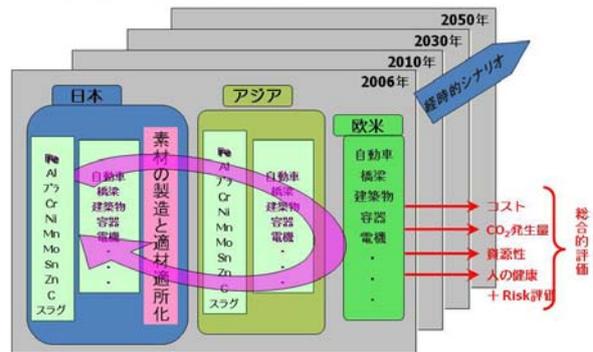
現在は、日本はある種の素材、材料、部品の部分が強。それらが強いうちに、それらをどのように総合的に使用しながら、どう供給していくか。そして日本の素材産業政策の中でどう生かしていくかということを考えることは重要なポイントである。

「素材戦略プロジェクトの意義」であるが、世界も今これに合わせていろいろなことをやろうとしている。個人的な言い方を許してもらえば、CO₂に関して日本は残念ながら世界の潮流に負けたが、しかし、「素材」では世界とまだ戦える。ただ、国連のUNEPの中に資源パネルができ、そこに対する日本のアクションは非常に弱いと思っている。

これから上流分野、資源供給、それを使うところを含めて総合的に考えることが非常に重要だと思っている。

[参考] 素材評価モデルの基本的な考え方

・ マテリアルフローモデルによる最適化評価



素材戦略プロジェクトの意義

- ・ 定量的に評価・把握できるモデルの構築の意義
 - 従来定量的に議論されてきた技術開発戦略、政策議論が時間軸を明確にした上で定量的に評価可能
 - 特に、資源を持たない日本産業の更なる発展のためには資源戦略を踏まえた現状及び今後の定量的な状況把握が必須である。
 - 資源有効利用促進法の中でリサイクル率だけでなく、総合的な評価を実施すべき
- ・ 国際連携の必要性
 - 従来の環境規制の大部分は欧州発であり、日本産業にとって、必ずしも有利ではない。
 - ・ 欧州での動向をリアルタイムで把握し、日本国内で検討し必要に応じて発信する体制が必要
 - ・ SOVAMATとの連携を重視
 - OECD、UNEP、EUが天然資源の持続可能な利用に関する共同研究に着手
 - ・ 2006年12月～天然資源の利用に関する国際的な技術検討を開始
 - ・ 資源を持たない日本としての対応と発信が必要(環境省が対応)
 - ・ 世の中の流れがIPCCを中心としたエネルギー問題から、資源循環、資源有効利用

資源有効利用率向上のための評価基軸として政策上必須

講演「エネルギー供給技術の展望と課題」

東京大学生産技術研究所 特任教授 金子祥三

3.11 東日本大震災発電設備の被災状況

東日本大震災発電設備の被災状況をみると、地震直後、太平洋岸の発電所は火力、原子力を問わず、ほとんど全部停止した。火力発電所は津波による浸水・冠水の被害が大きく、復旧に3カ月～2年を要すると言われている。

2011年3月末時点で停止中の発電所(東京電力)は、原子力発電所の福島第一、第二の合計が910万kW、火力発電所(広野、常陸那珂、鹿島)が920万kWということで、合計1,830万kWである。その他に東京電力と東北電力の共同火力発電所の東京への送電分が206万kWあり、それらを合わせて2,000万kW、総発電能力6,000万kWのうちの、30%を喪失し、これが3月の計画停電の最大の理由となった。



火力発電所被災例を紹介する。クリーンコールパワー研究所に世界最新鋭のIGCC(石炭ガス化複合発電)の25万kWのプラントがあるが、写真を提供いただいたので紹介する。発電所の地面は海拔3m、防波堤が2mである。

水が引いた後は、瓦礫が構内に散乱し、地上に置いてあった機器、モーター類、計器類などが泥水や海水に浸っていたため、水で洗い、作動確認をするなど、一つずつ復旧作業を進めた。現在の状況は、7月中に25万kWの運転開始を予定し、何とか夏季ピークに間に合わせるといふことで、努力されている。

教訓

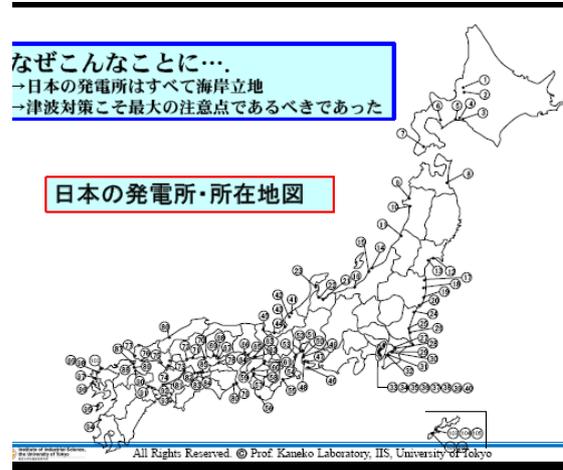
教訓としては、火力発電所が原子力発電所以上に津波に弱かったということである。津波対策を徹底的に強化することが必要である。非常用電源の強化(多様化・多重化)や安全・安心対策等々、反省すべき点は多々ある。

なぜ、大きな津波でこのような被害が出たかということであるが、日本の火力発電所は、内陸にある北海道電力の奈井江と砂川を除き、あとはすべて海岸立地である。

その理由の一つは、石油にしろ、天然ガスにしろ、エネルギー源を海外から船で輸入するため、なるべく港に近いところのほうが便利だということである。もう一つは、海水による復水器の直接冷却ができるため効率が良い。

唯一の例外は地熱発電所(例:東北電力の澄川地熱発電所)であるが、これは山の中にあるため、冷却塔による冷却を行っている。

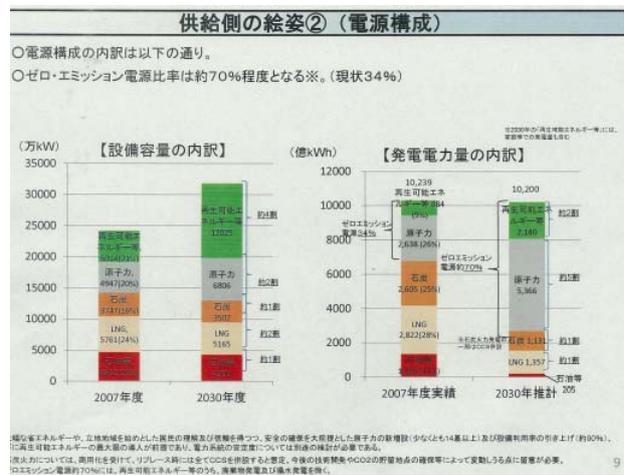
このように火力発電所が浸水し、12m のレベルに設置してあったタービンや発電機を除き、地上に置いていたいろいろな電気や機器類が被害を受けた。今、必死に復旧活動を行っているが、平均して1年くらいで被害に遭った火力発電がほぼ復旧する状況である。



今後のエネルギーの動向

原子力が動かせないとすると、足りない分を何で補うのか。火力発電で賄うか、再生エネルギーを急激に増やすしかないわけだが、それが本当にできるだろうかということである。

昨年6月18日にできたエネルギー基本計画では、2030年までに原子力の比率を50%に上げ、再生エネルギーを20%に増やす計画だったが、これは原子力を14基新設するという前提だったので、これはとてもできない状況になった。今は原子力が30%だが、これがどのくらい減るのか。太陽光、風力がどんなに頑張っても10%にいくかどうかなので、原子力の減少分は火力がカバーするしかあり得ない、というのが現実の姿である。



思い切った太陽光・風力の増設でも全電力の10%未満!



また、2030年までの長期計画のときに5,000万kWの太陽光発電を作るという想定になっている。全一戸建ての5割に太陽光を付けなければいけない。菅首相がG8で1,000万戸と言ったのはまあいい数値かと思うが、2030年の予定を2020年代のできるだけ早い時期にやると繰り上げたのに加えて、1,000万kWの風力を宣言した。

ところが、よく誤解されるのは、太陽光発電の場合、計画出力が5,000万kWであっても、年間平均設備利用率の公式換算係数12%を掛けると600万kWの発電能力となる。風力は、公式換算係数の22%を掛けると年間を通して運転できる能力は220万kWである。そうすると、太陽光と風力で8.2%にしかならないので、あと地熱やいろいろなものをかき集めて10%いくかどうか、それがぎりぎりの線だろう。目標としてはいいけれども、相当な努力を要する。

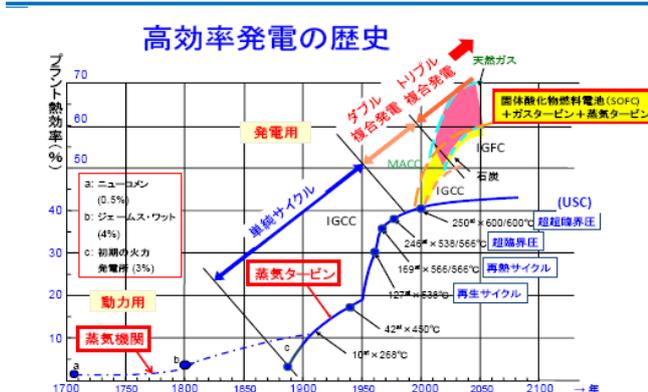
超高効率火力発電

容量的に太陽光発電や風力発電が原子力の代替ができないということであれば、火力発電の効率化をいかにスピードアップして実現していくか、これしか解決の道はない。

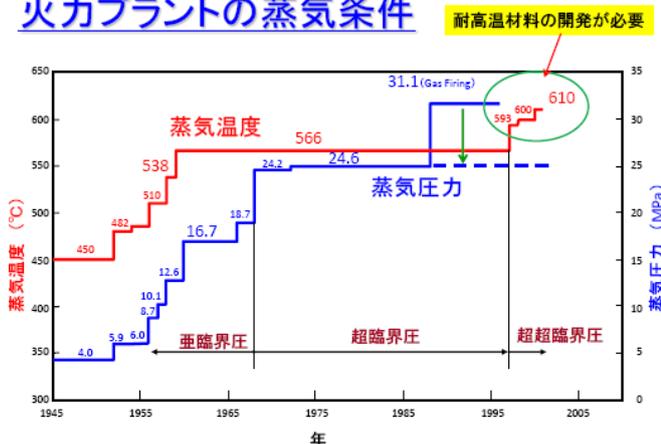
ICOPE(国際動力エネルギー会議)は日本機械学会、アメリカ機械学会、中国動力行程学会によって組織されて、2年に1度シンポジウムを開いているが、2003年のICOPEの基調講演で私が発表した内容を紹介する。21世紀の火力発電は、1990年から2000年までの蒸気タービンの第1世代があった。現在、第2世代のコンバインドサイクルが始まっており、天然ガス焚きが続々と建設されている。さらにこれからは石炭を使ったダブルの複合発電の時代になる。その後さらに高効率をねらおうとすれば、トリプルサイクルのやり方しかない。これは高温型の燃料電池とガスタービンと蒸気タービンとの三重の仕組みで発電するやり方である。2003年にこのような講演をしたわけであるが、今はこれを加速して実現しなければいけない。

現在高効率化の壁は第1世代については“材料”である。耐高温材料の開発が今行き止まっている。蒸気タービンは入りの温度と圧力を上げると効率が上がっていくが、鉄系の材料を使っている限り、620度くらいが限界である。

火力発電の高効率化の動向



火力プラントの蒸気条件



各材料は温度が上がると強度が落ちる。蒸気温度が600度を越えると金属温度はそれよりも高い温度になるため、そこで十分な許容応力が確保できる材料があるかどうか。これが使えるかどうかは鍵となる。

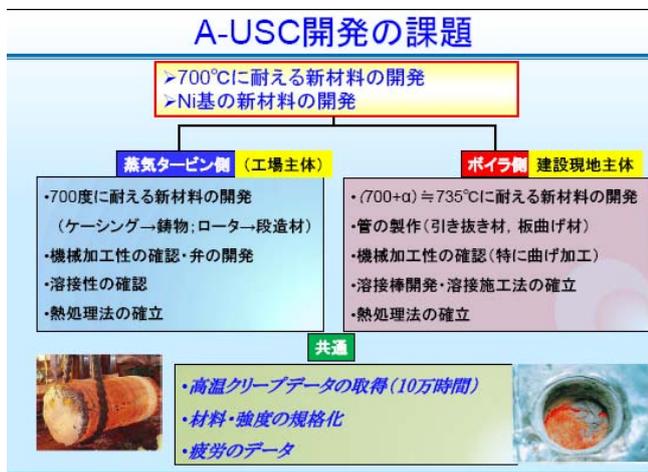
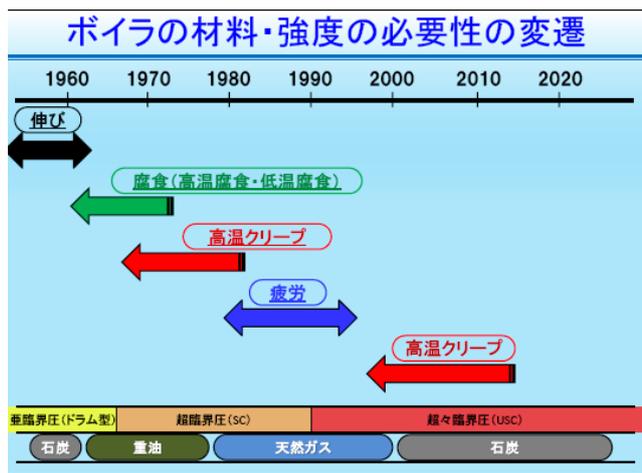
火力発電は、時代とともに燃料が石炭から油になり、天然ガスになり、また石炭に戻りというように変わっているが、それに伴う制約条件が何かも変わって来た。技術的なテーマは、重油のときは高温腐食、低温腐食、その後、超臨界圧によって効率が上がってくると高温クリープ、原子力が増えて火力が負荷変動を盛んにやりだすと疲労破壊が中心となり、今、再び高温クリープになっている。

高温クリープで破壊するときは、高温のため材料の許容応力が落ちてきて管が噴破するため、非常に大きな開口部ができる。これをフィッシュマウスと称し、魚が口を開けたような格好の破断形態を示す。そして、ここから蒸気が吹き出すと、この反力でくの字型に曲がってしまう、という高温クリープ破壊があちこちのトラブルで起こる。こんなことがないようにしなければいけない。

もう一つの課題は、蒸気温度をどこまで上げられるか、である。

現在は、フェライト鋼をベースにして9%、12%くらいのクロムを混ぜた材料を使っているが、これがほぼ限界に来ているということとでオーステナイト鋼を使おうとするといろいろな問題が出てきている。次のステップは800度くらいに耐えるニッケル合金をボイラーの材料、蒸気タービンの材料に使うということであるが、残念ながら新材料の開発は相当先になるだろう。

新材料を開発するときには、10万時間の高温クリープデータが必要となるのだが、デー



複合発電システム技術を石炭ガス環境技術と組み合わせて石炭にも適用可能としたのが石炭ガス化複合発電（IGCC）である。固体である石炭を粉にしてガス化し、ガスタービンのコンバスターで燃焼し、あとはガスタービンと蒸気タービン、両方で発電する。

そのためには、石炭を高効率でガス化するガス化技術が必要になるが、万一、天然ガスの入手が困難の場合でも石炭から合成天然ガスを作ることができる。

ダブル複合発電（IGCC）は勿来発電所、25万kWで動いているが、では、その次はどうするか。次をやらなければ、原子力で下げることができなくなったCO₂をさらに下げることができない。

そこで究極の高効率発電である「トリプル複合発電システム」が求められる。

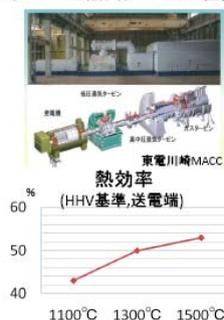
トリプルサイクルにすると、LNG燃料で65%、石炭でも55%という飛躍的な効率向上が可能である。電力を確保して、なおかつCO₂も下げる、原子力で貢献できない部分も目いっぱいこれでカバーする。究極の高効率発電をいかに早く実現するか、これが唯一の解決策だろう。

その鍵を握るのが固体酸化物型燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）である。まさに材料がその鍵を握る。基本的には、セラミックスであり、基体のサポートをしているのはジルコニア、電解質である電気を発する根本的なところはYttria-stabilized zirconiaというイットリアを添加したジルコニアである。燃料に接する部分の電極、燃料極はニッケル、空気に接する電極はペロブスカイトでABO₃の結晶構造。具体的にはランタンコバルトオキシド、あるいはランタンマンガンオキシドといったような物質を使っている。

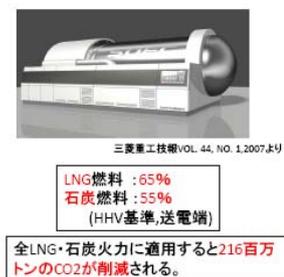
私は30年くらい前に開発を行ったが、ペロブスカイトとYSZとニッケルの3種類張り合

トリプル複合発電システム (究極の高効率発電)

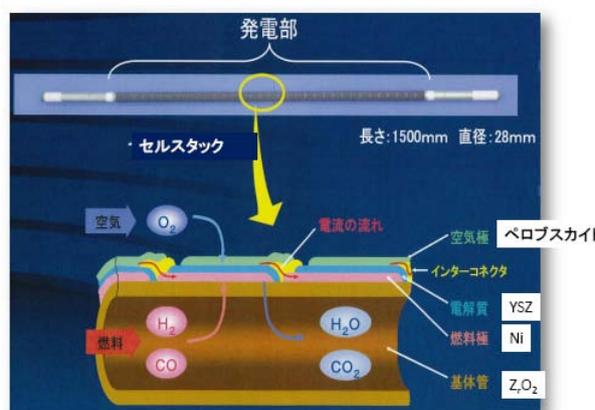
ダブル複合発電システム
ガスタービンと蒸気タービンの組合せ



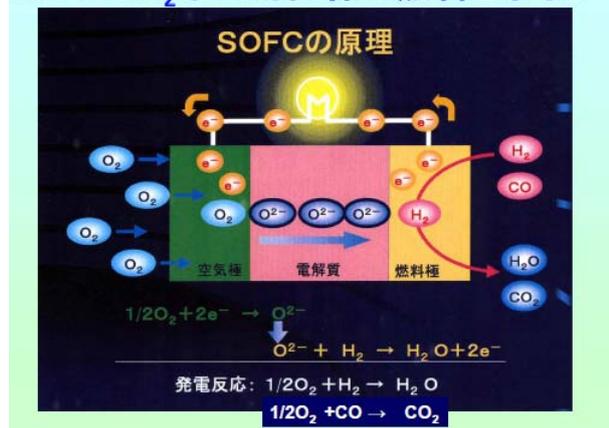
トリプル複合発電システム
固体電解質形燃料電池とガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ



円筒形SOFCの構造



SOFCはH₂もCOも同様に燃料となる！



わせ、しかも 1000 度で運転しないとイケないのだが、熱膨張の差があると、クラックが入って割れてしまう。イオン導電性、電子導電性などの条件を付して、2 年間で 2,000 種類をスクリーニングして 5 種類選択したが、それは現在でも使われている。

SOFC の利点は、他の燃料電池と違い、酸素イオンが移動するため、基本的に燃えるものなら何でも発電することができる。CO と H₂ の発電能力はほぼ等価のため、CO と H₂ の無限の組み合わせでほぼ同じパフォーマンスが出せる。燃料電池自動車が使っているプロトン導電体では有効成分は水素だけなので、C と H から成る化石燃料を無理やりに水素に転換しなければいけないが、SOFC はその必要がない。

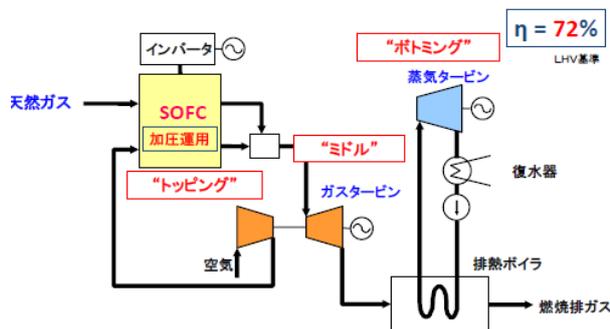
固体酸化物燃料電池 (SOFC) の原理であるが、ジルコニアの構造は四価なので、ジルコニアにイットリアを 5%~20% くらい混ぜると三価のイットリアのところで酸素の格子欠陥ができる。酸素が少し欠損した状態になっているところに、酸素の分圧差で酸素イオンが移動し、そのときに電気がでる、ということになる。

なぜトリプル複合発電は効率が高いのかというと、これは典型的なエクセルギー再生の例である。SOFC は 900 度~1000 度において、燃料極にニッケルを使って、50% くらいの効率で単体は発電する。50% は電気になるが、残り 50% は熱になって出ていく。メタンを入れると、水蒸気改質反応 (Steam Reforming) によって吸熱反応でメタンが CO で H₂ に分解し、そのときに燃料電池の発電した熱が自動的に供給されて、熱が化学エネルギーに変わって、2 割くらいエネルギーが上がるという現象が起きる。内部改質と言っているが、自動的に水蒸気改質反応が起こり、効率を引き上げる。水蒸気改質反応の触媒も Ni、SOFC の燃料極も Ni であるため、このような魔法のようなことが実現できるのだが、これは偶然であり、そう “柳の下にドジョウ” はいない。

このようにトリプルの複合発電は燃料電池が主体で、50% 以上、この SOFC で発電する。1000 度でできた排熱をガスタービンに入れて、ガスタービンを回す。燃料電池とガスタービンと蒸気タービンの 3 つで発電するため、70% に近い高効率となる。

ガスタービン、蒸気タービンはランキンサイクルの制約を受けるので入口温度は高いほど良い。SOFC の排熱が 1000 度ということは、非常に恵まれた条件である。こうやって最

トリプル複合発電システムとSOFC (燃料:LNG)



SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (固体酸化物形燃料電池) ⁵⁵

SOFCの実物



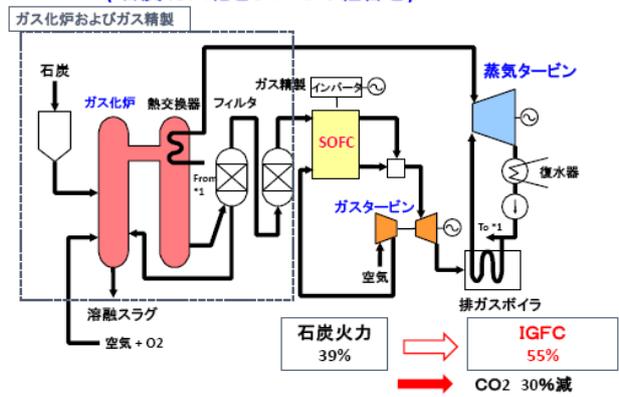
高効率を組んでいくと、出力の半分以上が SOFC である。横綱が SOFC、ガスタービンは太刀持ち、蒸気タービンは露払いといったような現象になる。ぜひ、学生さんには「機械工学からマテリアル工学の時代」と伝えていただきたい。

SOFC の実物を示す。基本的にはこれがすべてである。100 万 kW の発電所はこれを数百万本使用する。燃料電池の試験は大学でもできる。しかも、昔、私はいい材料を作ったのだが、なぜそれがいいのかわからなかった。大学で第一原理計算や分子動力解析など行ってもらうことで、電子の流れやイオンの流れがいいことがわかり、非常にエキサイティングに研究を進めている。ここは大学がかなりの役割を果たせる非常に新しい分野だと思うし、産学連携の典型的なサンプルになるのではないかと考えている。

石炭ガストリプル複合発電 (IGFC) は、石炭をまずガス化し SOFC に入れる。石炭を使ってトリプルができるようにした例を示す。

G8 ドービルサミットにおける首相のコメントには、エネルギーの 4 本柱であった。その時、再生エネルギーだけでなく、化石エネルギーにも触れており、「石炭ガス化と燃料電池を組み合わせた究極の高効率で 50% 効率を改善する」と言っている。総理大臣がトリプル発電を目指せと言っているのだ。また再生エネルギーのポイントは、年間平均利用率をいかに上げるかである。

石炭ガス化トリプル複合発電 (IGFC)
(石炭 ガス化と SOFC の組合せ)



課題の解決策：安全・安心のために

今回の原子力の反省の一つは、“安全と安心のためには必要な投資をし、日頃からやるべきことはやっておかなければいけない”ということである。それから、東京湾岸の火力発電は LNG に偏重している。東京湾岸には、コンバインドサイクルを含め 1,200 万 kW の高効率天然ガス火力と、同じく 1,200 万 kW の従来型の天然ガス火力がある。もし東京湾に LNG タンカーが入ってこられなくなったら 2,400 万 kW の発電能力を喪失する。天然ガス焚きは従来型であれコンバインドであれ、極めて効率的だけれども、脆弱な発電システムである。

今後、IGCC ガス変換ができれば、石炭からのメタノール製造や、CO と H₂ からいろいろな液体燃料も作ることができ、天然ガスと石炭がインターチェンジャブルになる。そういう意味で、このガス化の技術というのは極めて重要であると考えている。

講演「社会基盤のグリーン化：材料とシステムをどう繋ぐか」

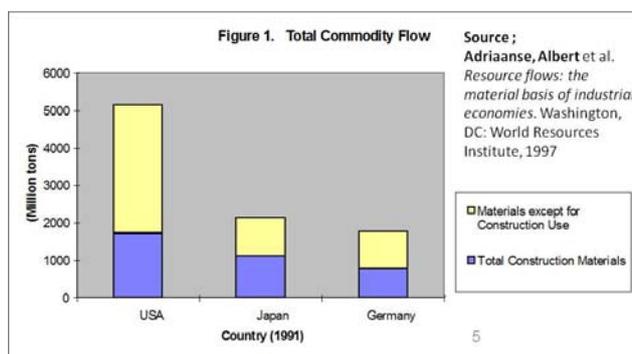
東京大学生産技術研究所所長・教授 野城智也

グリーン・イノベーションとは、「全く新しい技術や考え方を取り入れることによって、これまでのモノ、仕組みなどを塗り替えて新たな価値（＝Sustainability、低炭素）を生み出し、持続発展型社会、低炭素社会実現にむけて社会に大きな変化を起こすこと」と理解している。ではボトルネックは何かと考えると、建築・土木における構造物に使用される膨大な素材、材料をいかに全体システムとどうつなげるか、という点にあると思われる。

建築、土木は人工物として重量が大きく、かつ圧倒的に量も多い。

このグラフは 1997 年におけるアメリカ、ドイツ、日本における建設関係で使われている材料が一国のマテリアルフロー、コモディティフローの中でどのくらいのシェアを占めているかを重さベースで見たものである。ドイツや日本では半分、アメリカでは3分の1を占めている。この傾向は現在もほとんど変わらないと思われる。

土木施設・建築など社会基盤に使用される材料の総量は重量比においては、一国の資源利用総量(commodity flows)の三十分の一から半分程度を占めているといわれている



いわゆる3R促進は資源生産性向上に寄与する



社会基盤における資源生産性向上

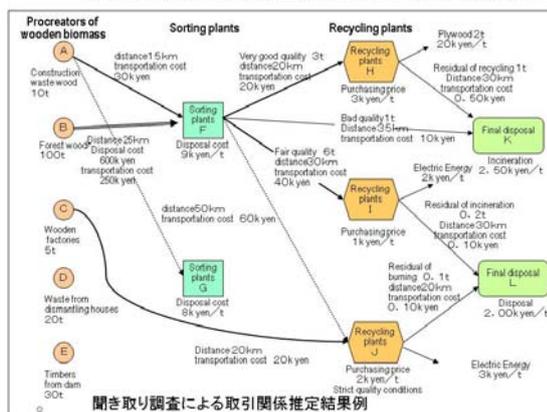
グリーン・イノベーションを推進するためには、社会基盤施設における資源生産性の改善が課題となる。すぐ思い浮かぶのは 3R の促進である。

確かに、3R は資源生産性向上に寄与するが、いろいろな種類の使用済みの素材や材料があり、これらを自動的に選別する技術を取り入れづらいのが現実である。しかも、3R の実効性は社会基盤施設使用終了時点での社会経済状況にも影響されるため、需給バランスは予想しがたく、フィジカルな距離制約も無視できない。

- だが、社会基盤施設使用終了時点での社会経済状況に影響される
- 需給のマクロバランスの変動
- 地域内におけるsupply/demand chain がad hoc で不安定

7

社会基盤解体材にかかわる地域のdemand/supply chainはアドホックである
需要者から見て品質・供給量の保証が脆弱かつ広く薄く存在



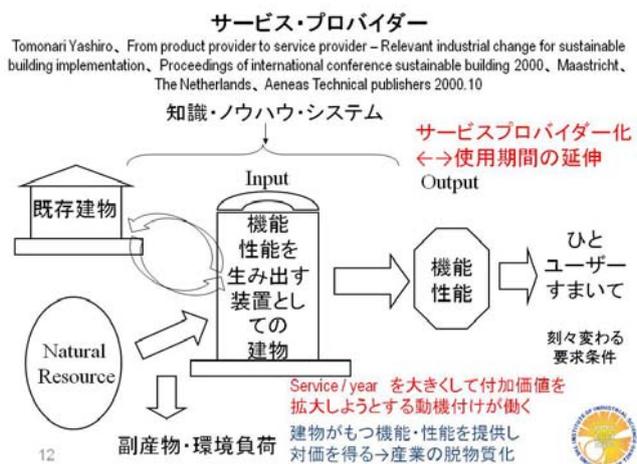
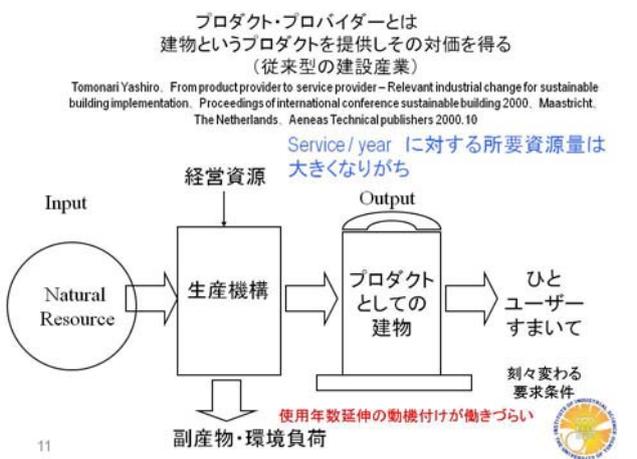
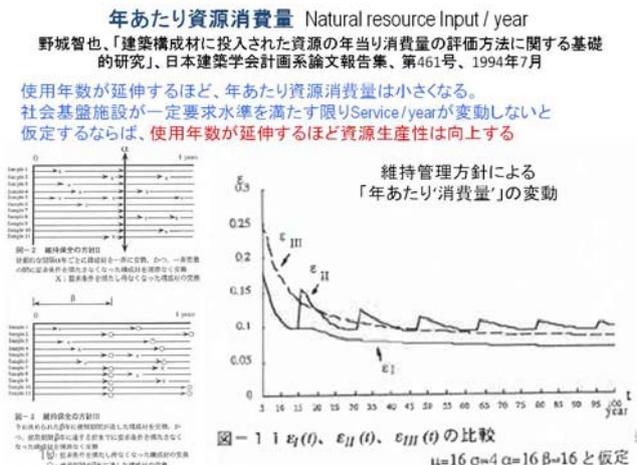
建設廃棄物から出てくる木屑をバイオマス系のガス化プラントに持ち込めないかということについて調査をした取引関係推計結果例である。マテリアルバランスとしては地域内における賦存量は見合うものの、マテリアルフローの川下事業者からすると品質も供給量の保証も全くない状況である。将来の3Rには不確実性があり、リサイクルできるという予測だけで休心し思考を止めるのは極めて不十分である。

社会基盤施設の使用年数の延伸こそが、より確実な資源生産性向上策であり、我々にとっての課題である。

「年あたり資源消費量」のグラフを見るとわかるように、長く使えば使うほど、資源生産性は向上する。部材交換のストラテジーによって資源生産性がどのくらい変わるかを計算してみたが、あまり大差なく、結論としては長く使うほど資源生産性は向上するということである。

従来の建設産業、すなわちプロダクト・プロバイダーは、建物という、巨体な人工物を提供し、それに対して対価を得るというものである。そのため、建設産業が経済活動の中で自立的に運動しようとする、どうしても引き渡すプロダクトの量は減らしたくない。市場の中で人工物が飽和すると、今度はそれを壊して更新しようという経済的な動機が生まれてしまうという性格が見られる。

それに対してサービス・プロバイダーという考え方がある。機械工学のサービス工学分野の方々と議論しているのは、むしろこういった人工物を扱う産業は、サービス・プロバイダーになっていかなければならない、ということである。つまり、機能を常にアップグ



リードしていく、あるいは要求条件に適応させていく、そしてサービスを対価として得るような産業に変えていく。そのためにエンジニアリングを変えていかなければならない、ということである。

これまでの、経済規模を維持するために、大量の資源を吸い込み、そして結果としての多くの廃棄物を排出するというあり方から、むしろ使用年数を延伸し、それによって機能を提供し、対価を得るといった経済的な仕組みと技術を両立させ、それによって資源生産性を向上させる、これが我々の現在の考え方である。

使用年数の延伸のための2つのアプローチ

より確実な資源生産性向上手段は、社会基盤施設の使用年数の延伸であるということ述べたが、そのためには2つのアプローチが考えられる。1つは、物理的耐久性による使用年数の延伸というオーソドックスなアプローチ、もう一つは、機能的持続性（耐用性）を構築することによる使用年数の延伸である。

物理的な耐久性を上げるためには、例えばコンクリート構造物や鋼構造の物理的な耐久性の向上などの研究が進んでおり、日々、経験知が蓄積されている。このようなアプローチから革新的材料ができることを願っているし、それが出来ればまさに科学を起源とするイノベーションが創出されるだろう。

しかし、我々は、それだけでは使用年数の延長に寄与する必要十分条件になり得ないと考えている。

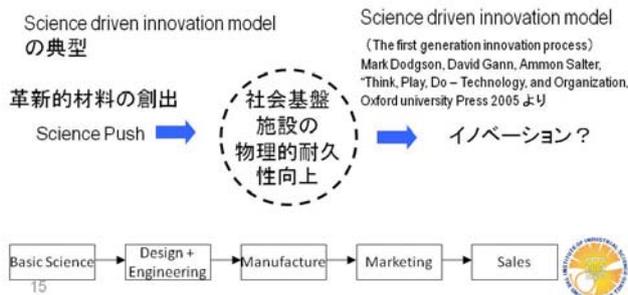
1番目の課題は、東日本大震災に象徴されるように、構造物は物理的耐久性があってもさまざまな災害外力に対して壊れたり、機能停止してしまう。我々の分野では、Resiliency、多少傷んでも復元する、回復力という言い方をしているが、Resiliency向上が課題となる。

2番目の課題は、省エネ性能である。

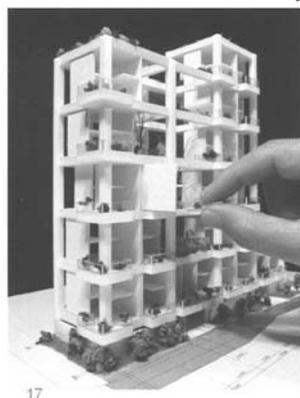
そして、3番目の課題は、要求条件の変化に対応する適応性である。

物理的耐久性向上による使用年数の延伸 (従来の工学的関心)

- 例えば
 - コンクリート構造物の物理的耐久性向上
 - 鋼構造の耐食性向上 など



要求条件の変化に対する適応性 (adaptability) 向上策



スケルトン(構造物・共通設備・外周壁)

インフィル(内装・各室設備) 要求条件の変遷にあわせて更新

スケルトンとインフィルを完全に独立して更新交換できる技術が重要

3 番目の課題の「要求条件の変化に対する適応性向上策」について少し詳しく述べる。

土木施設も建築施設も、設計を計画したときの計画要求条件は不変ではなく、要求条件は変わっていく。そのため、物理的耐久性に問題があるというより、要求条件に適用できないことが除却、つまり壊す要因になってくる。除却されないために adaptability をいかに上げていくかということが重要である。

そこで、建築物については、スケルトンとインフィルとを明確に分ける考え方が生まれている。スケルトンとは、50年、100年、場合によっては200年という長期に使っていくものとする。それに対してインフィルは、その都度ごとに変えていくことができる物理的な仕様として設計、計画する。スケルトンをいじらなくてもインフィルを自由に換えることができるテクノロジーに仕立てていくことが目標である。

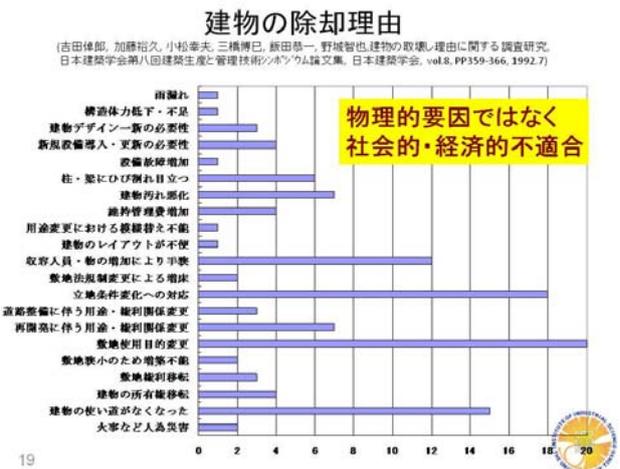
建物の除却理由を調べた例である。東京都千代田区において悉皆調査を行った。(1992年)

この図が示すように、物理的耐久性を原因に除却した建物はほとんどなく、社会的経済的な要求条件に不適合になったことが除却の主動機としていることが実態調査でも確かめられている。

このようなことから、物理的な耐久性を具備しただけでは、使用年数を延伸させて、資源生産性を上げていくことに貢献できないということがわかる。機能的持続性をどう維持していくかということがカギとなる。

ここで注意しなければいけないのは、“材料”の組み合わせと巨大人工物である建築、土木施設の関係は、システム性能とシステム構成要素との関係として捉えるべきことである。構成要素たる材料にかかわるイノベーションは、もちろん重要な必要条件の一つではあるが、そのままシステムレベルでのイノベーションにはならないという認識である。

建築の環境性能についての国際規格 ISO21931 では、前提条件として建物には



建築の三つの側面

ISO 21931 Sustainability in building construction — Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works — Part 1: Buildingsより

1. A building as an end use product and an integrated assembly of products
構成材の集合体としての建築→LCA評価
構成材料の保有性能
 2. A building as a place to live, work or socialize
居住・就業環境を提供する場としての建築
 3. A building as a system in operation
物質・エネルギーの入出力システムとしての建築
システム性能としての機能的持続性
- これらの三側面に即して、建築の環境性能が設定される



3つの側面があることが示されている。

第一は、建物はさまざまな材料の集合体であるので、LCA 評価と建物の持っている性能は、ある意味では連続しているということで、構成材料の保有性能がシステム全体の性能と直結して捉えられるという側面。

第二は、居住・就業環境を提供する場としての建築としての側面。

第三は、物質・エネルギーの入出力システムとしての建築という側面である。

これら3つの側面に即して、建築の環境性能が設定されるべきであるが、この規格をつくる際に、バックグラウンドがLCAである方がおられて、1番目の側面だけを強調され、非常に苦労した経緯がある。これは国による立場の違いというより、国際規格をつくる際に出てきた方のバックグラウンドが持つ発想法によると思う。一つの側面からだけ見ると洩れ落ちる論点が出てくる。

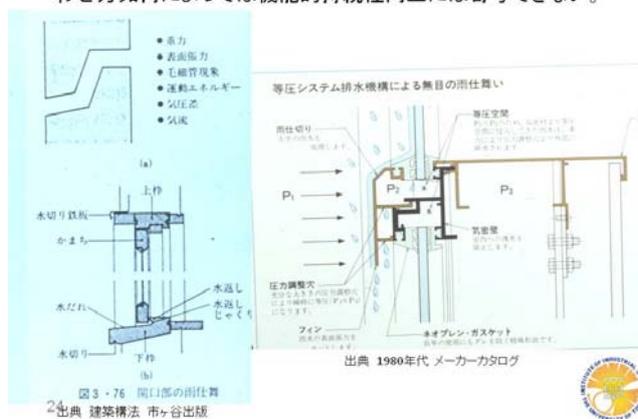
この図は、たとえ優れた材料であっても、その寸法や形状の組み合わせ方によっては期待する性能が出てこないという例である。

これは、我々建築技術者にとっては研究対象というより、技術の組み合わせによるシステム実装の場といえる。

これらの断面の形は、水をどのように形状的に制御するかを工夫した、経験知識の塊の結果として出てきている技術的解答例である。

かつてシリコンシーラントやウレタン系のシーラント材に非常にひどい目に遭った経験をふまえ、できるだけ材料性能に依存せずに、形状特性で水が中に入らないような形状にして、圧力制御によって水の侵入を防ごうとした例である。形状や寸法が大変重要な要素となるが、さまざまな実験を行って形状寸法を決めている。

優れた材料であっても、その寸法形状、他の構成材との組み合わせ方如何によっては機能的持続性向上には寄与できない。



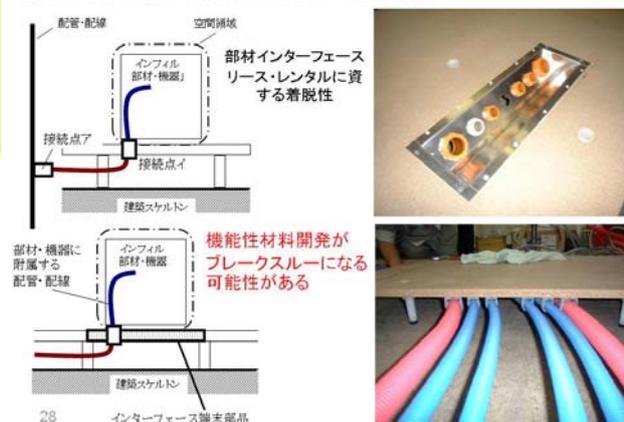
その一方で、我々は大いに機能材料、革新的な材料の出現を待っている。

例えば、先に述べたようなスケルトンとインフィルを分けていくことを建築分野で実現しようとする、インフィルに当たる部分をレンタル化することが一つの解になるのではないかと考えているし、実装されているところもある。

例えば、床システムを作り、その上に

要求条件の変化に対する適応性 (adaptability) 向上策
インフィルの機能 (= サービス) を提供して対価を得るビジネスモデル
インフィルのリース・レンタル化

インフィルユニット交換
野城智也、西木賢二、信太洋行、「既存建物の再生手段としての建築インフィルの動産化の可能性に関する考察」、日本建築学会計画系論文集 NO.577 2004年3月



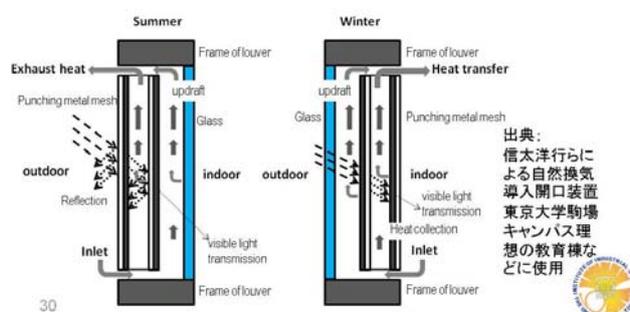
工場生産されたキッチンセットやモジュール化された部品を置く。これらの部品を着脱可能できないか、また、下にある給排水管をできればポンプを使わずに給排水できるテクノロジーがないか、床下の工事をなくして床上の見えるところから配管・配線類をプラグイン、プラグアウトできないか等々の課題に、チャレンジしている。これらの要求を満たすために多種材料による複雑な形状のものを作り込まなくても、まさに一つで代替できるような材料があったら、これはすばらしいと思っている。

これは、我々の研究所が駒場教養学部で開発した自然換気導入開口装置であるの例である。

ここでは三層の材料がシステムを構成している。夏は熱を反射し、冬は輻射熱を取り入れ、かつ視覚的には内部から外の景色が見えるよう層を構成するパネルの穴の開け方も工夫している。ただ、これだけ重装備の構成を、あらゆる建物に使うわけにいかないなので、これら三層のパネルが担うさまざまな機能を単独で担うような機能性材料の出現を切望している。

システム機能のキーとなる材料が開発されることで、社会基盤の機能的持続性が向上し、イノベーションが誘発・励起される可能性も秘められている。

- 例えば、建物において大スパン無柱空間
- 自然換気のできる中高層建築用サッシ



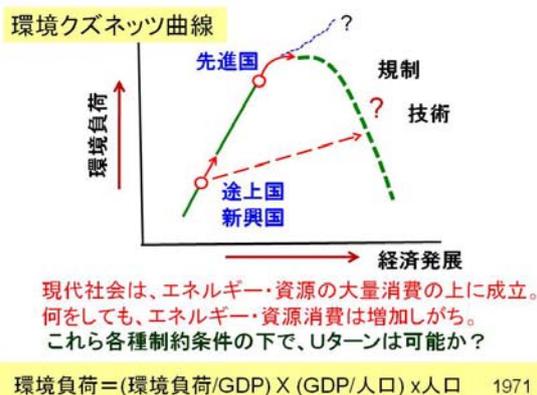
システムと材料をつなぐときに重要なことは、設計において材料を適材適所に使うための知識の蓄積と体系化である。実験室でのデータだけでなく、フィールドでの実績も含めた知識の蓄積・体系化が重要だと考える。

講演「21世紀の化学技術戦略：グリーンケミストリーの展望と課題」

日本化学連合会長 東京大学名誉教授 御園生 誠

ケミストリーの上流はエネルギーと原材料の問題に、下流は製品に関わっている。材料、機械、土木建築など、分野は違うものの、関係する部分が非常に多いと思うので、一緒に考えていきたい。また、最近の日本の科学技術政策やマスコミなど、「脱化石資源、即、自然エネルギー」という風潮が見られる。それは健全ではなくむしろ有害だと思っている。

言いたいこと(マクロな視点から)



現実に基礎を置いた議論が必要

これは、環境クズネツ曲線である。経済発展や人口の増加につれて、環境負荷が増える。先進国は頑張って環境負荷を下げようとしているけれども、簡単にはいかない。その上、発展途上国・新興国がこのまま経済発展を続ければ地球は立ち行かなくなる。現代社会はエネルギー・資源の大量消費の上に成り立っているため、何をして、エネルギー・資源消費は増大しがちである。そういう制約条件の中でUターンは可能か、という話がマクロに見ると大きな課題であろう。

たとえば、電気自動車にするとCO₂が削減するのだろうか。

私自身も計算して若干驚いたのだが、何をやっても、簡単にはエネルギー消費は減らないという例である。

ガソリンの軽自動車と電気自動車の価格差は350万円である。

走行時のCO₂削減量、走行時CO₂排出量を考えると、1tのCO₂を減らすためには38万円かかる。製造時のCO₂排出量は不明であるが、相当大きいと推定される。仮に日本のGDPとCO₂排出量の比を使って、価格差からCO₂排出量を推定すると、製造時に8tのCO₂を排出することになる。そうすると、電気自動車によって、CO₂は減っていないことになる。

つまり、今の世の中で、エネルギー節約に貢献しようと思っても簡単にはできないことを示している。大事なことは、現実のデータに基礎を置いた定量的・合理的な議論をすることが我々科学・技術者が基本的な倫理である、ということである。

もう一つの例として、「2020年代前半に電力の20%を自然エネルギー」「1000万戸の屋根に太陽電池」という話が出たが、これは、とんでもない話だと思う。太陽光発電の現状は、エネルギー密度は小さく、現在の供給量はわずかである。そして非常に高価である。知合いが太陽光発電を家に付け、その15年間の実績をとっているが、発電：売電：買電の割合は、3：1：10である。

例：電気自動車によるCO₂削減とコスト

軽自動車との価格差 459 - 100 ≙ 350万円(古い?)

走行時CO₂削減量 ガソリン節減量; 燃費20 km/L, 10万km走行で5000 L、約12トン、約50万円節減

走行時CO₂排出量 発電時: 0.42kg/kWh. 10万kmで約4トン。

→ (350 - 50) / (12 - 4) ≙ 38万円/t-CO₂

製造時CO₂排出量: 不明(相当大きいと推定される)

仮に、GDP 500兆円でCO₂ 12.5億トンから推定すると、350万円で約8トン。4 + 8 - 12 ≙ 0 CO₂削減なし?

東日本大震災の教訓

今回の大震災から得た教訓である。

まず、大震災における自然の猛威は、我々は科学技術の力を過信しすぎて、真っ向から押さえ込もうとする技術に偏ってしまったのではないかと、ということである。これが第一の反省点。次に、想定外の事故後の対策が、ソフト面でもハード面でもほとんどできていなかったことは非常に問題がある。

それから、エネルギー問題に重要な示唆を与えた。量やコストからいって、簡単には風力・太陽光発電に替えられない。

最後に、科学コミュニケーションの不足である。放射能に関して、基準値の何倍とか平常の1万倍と言われても、一体それがどのくらい危ないのか、ピンとこない。こういう状態は、社会にとっても科学技術コミュニティにとっても不幸な状態だったと思う。

東日本大震災の教訓

地震+津波+原発事故の巨大な被害

技術のあり方 (科学技術者の反省と責任)

1. **自然の猛威とそれに対する向き合い方**
2. **原発と安全対策**; 事前、事後の対策の不備
3. **原発事故とエネルギー**; エネルギーの重要性(長期、短期、緊急戦略); リアルスティックな構想が必要。太陽・風力に早期の代替は不可能
4. **科学コミュニケーションの不足**
放射線リスク、原発事故レベル7、報道(海外向)

第1の制約条件: エネルギー 一次エネルギー選択の基準

1. **供給量**(どれだけ増えるか、減るか?)
2. **時間軸**(いつ頃、供給可能か、なくなるか?)
3. **経済性**(他と比べコストパフォーマンスは?)
4. **環境調和性**(環境負荷は?)
5. **利便性**(使いやすいか)
6. **エネルギー収支・物質収支**
(得しているか? 副生物の利用は?)

エネルギー資源

(化石及びウラン資源埋蔵量と可採年数)

化石及び原子力が全一次エネルギーの90%

	確認埋蔵量	年間生産量	可採年数
石油	1.24兆バレル	300億バレル	42年
天然ガス	177兆立方メートル	2.94兆立方メートル	61年
石炭	8480億トン	64.8億トン	130年
ウラン	547万トン	4.1万トン	133年(再利用なし)

この他に非在来型の石油、天然ガスの埋蔵量がほぼ同程度があるとされる。

石油可採年数の推移

OGJ: 50年(2007), 50年(2006), 49年(2005), 49年(2004), 44年(2001)
JOGMEC: 40.5(2006), 40.6(2004), 40.6(2002), 39.9(2000), 41.0(1998)
石油、天然ガス、石炭の消費量は、今も単調に増加を続けている

第一の制約条件はエネルギーである。

その議論をするときには、どのくらいの量が期待できるか、原発が止まったらどれくらい減るのか、など量の問題を理解しすることが不可欠である。

そして、それはいつごろ起こるのか。この時間軸はわりあい無視されがちであるが、非常に重要である。当然のことながら、コストパフォーマンスは必要であるし、環境調和性、利便性、エネルギー収支、これらがエネルギー選択の基準となる。

これらを総合的に考えることで、あり得るエネルギー選択のオプションが見えてくる。現在との主力となっているエネルギー資源、石油、天然ガス、石炭、ウランの埋蔵量と可採年数である。

今、一番の気がかりは、これらエネルギー資源を使い続けると地球温暖化にどのくらいの影響があるかということだろうと思うが、これにはかなり議論がある。少なくとも過去の温度上昇の測定値の信頼性や、温度上昇が始まる前の地球全体の温暖化を考えると、大部分が人間活動によるとは思えないので、IPCCの結論は少しオーバーではないかと思っている。この問題では、対策が過大でも過小でも被害が甚大となる。不確実な中でも、妥当な判断をすることが重要である。被害が緊急かつ甚大ならば劇薬が必要であるが、そうでなければ漢方薬がよいのではないか。つまり、穏当な対策を実施し、結果をモニターしながら柔軟に修正していけばいいのではないかと考えている。コストパフォーマンスも重要である。

選択条件のうち「時間軸」と「量」について再度考える。

時間軸ということは、「時間軸を考慮したLCA」という意味だが、通常、LCAは定常状態について議論しているのだが、例えば、太陽電池を作るときに出すCO₂と太陽電池を動かしてから取り返すCO₂では時間差がある。そういうことを考慮しないと、エネルギー政策やエネルギー戦略を間違えるのではないかと思っている。

また、「量」に関しては、その量が全体に対してどのくらいを占めるかということはエッセンシャルな問題である。いざとなればエネルギー多消費産業を海外に出さざるを得ないという人もいるが、日本はともかく地球全体としてはCO₂が減るわけではないし、動かすためのエネルギーも必要である。経済性も含め、それら込みの評価をする必要がある。

グリーンケミストリー

グリーンケミストリー (GC) は、「環境に優しい化学」により持続可能な社会の実現に貢献することを目的としている。優しい化学技術の体系を作ろうという話であるが、ポイントは出てきた環境負荷を処理するのではなく、そういうものが出ないように設計してから技術開発をしようということである。GCが新時代の材料技術の鍵を握っている。

これはよく使われるグリーンプロセス評価である。E-ファクターは、目的とする製品に対して副生物がどれくらい出るかということであるが、製品に対して100倍以上の副生物が出ることもある。もちろん、そのまま捨てるわけではなくて再利用や無害化処理もしているが、副生物を大いに減らそうということがコンセプトの一つであり、日本にもGC以前からすぐれた成功例がある。

グリーンプロセス; E-ファクター

	生産量 (トン/年)	E-ファクター (副生物/主生成物)
石油精製	10 ⁶ - 10 ⁸	ca. 0.1
基礎化学品	10 ⁴ - 10 ⁶	< 1 - 5
ファインケミカルズ	10 ² - 10 ⁴	5 - 50
医農薬、電子・光部材	10 - 10 ³	25 - >100

(Sheldon)

副生物が非常に多い。溶媒、試薬等、特に分離精製工程で多いため。

表の下方は、付加価値大。品数多い→廃棄物総量大。

15

グリーン触媒プロセスも、成功例は多数ある。日本のカプロラクタム製造 (住友化学)、非ホスゲンポリカーボネート製造 (旭化成、三井化学-GE)、酢酸エチル直接合成 (昭和電

工) 等々である。海外にも近年は多くの成果が生まれており、医農薬合成、バイオ由来製品、バイオ触媒があげられる。

例えば、固体触媒による気相ベックマン転位である。ナイロン原料を作るために何十年にもわたって発煙硫酸を使っていたので、山のような硫酸アンモニウムが副生していた。1トンの原料を作るのにその倍以上の硫酸が出ていた。かつて硫酸が売れていた時代もあった。その後は、使われず非常に困っていたが、数年前に新しいプロセスに変わって硫酸が全く出なくなった。

固体触媒による気相ベックマン転位

ナイロン原料の製造 (廃棄物激減)

シクロヘキサノン $\xrightarrow[\text{TS-1}]{\text{NH}_3, \text{H}_2\text{O}_2}$ シクロヘキサノンオキシム $\xrightarrow{\text{新ゼオライト}}$ ε-カプロラクタム

カプロラクタム:
 世界で380万トン/年生産
 従来法(濃硫酸使用)で大量に副生した硫酸アンモニウムが、新固体触媒の使用によりゼロに!
 旧法 2 t/t → 新法 ゼロ

2006年度 GSC賞 経済産業大臣賞 2003年4月より、本格的操業(6万トン/年)

バイオマス

エネルギーとしてのバイオエタノール

エネルギー収支はプラスか? CO₂は減るか?
 “カーボンニュートラル”はあり得ない

エネルギー利得(エタノールエネルギー/投入エネルギー)?
 トウモロコシ(米国) 1.3倍 サトウキビ(ブラジル) 6-7倍

- 穀物をすべてエタノールにしても世界エネルギー消費の4-5%
- 森林国日本で、全消費エネルギーを日本の材木で供給すると、山は2年で丸裸。エタノールにすると1-2ヶ月!
- 農地 1 ha バイオエタノール 石油換算 5-8 kL
- 太陽光発電 石油換算 140 kL

19

グリーン原料の転換技術についても幾つも候補がある。結論から言うと、「化石資源の確保と有効利用が当面が一番大事」だと思っている。私に近い分野における興味深い例をあげると、白金ナノ粒子触媒がある。石油精製のためにアメリカで開発され、戦後、目の目を見たが、白金の超微粒子を触媒に使う石油製品の性能を上げるプロセスの一つである。当初は、石油に貴金属の白金を使うとはとんでもないという時代だったが、若干の幸運にも恵まれ、これがスタンダードの方法になった。そして、その技術成果が自動車触媒の排ガス処理に生かされ、今や燃料電池や蓄電池の触媒としてさらに発展しつつある。いずれにせよ、グリーン材料において、使用量の最少化、長持ち、リサイクル、代替元素という4対策は挑戦的な重要課題である。

グリーン原料として一部の人が期待しているバイオマスであるが、カーボンニュートラルということとはあり得ない。バイオエタノールを作るのにどれくらい化石燃料が必要かを計算すると、アメリカでトウモロコシからバイオエタノールを作るために使った化石燃料の1.3倍のエネルギーが出ると言う。つまり0.3分しかゲインがない。ブラジルの場合、6倍のゲインがある。

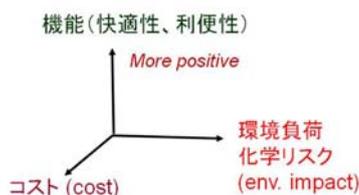
世界の穀物をすべてエタノールにしても世界エネルギーの4~5%にしかない。推定によると日本で使うエネルギーを日本の材木で効率よく使うと日本の山は2年くらいで丸裸になる。もしバイオエタノールにすると1~2カ月である。太陽光発電もエネルギー密度が低いと言われるが、バイオエタノールはさらに少ない。

とはいえ、バイオマスは結構使われている。エネルギーとしては、量的にはあまり大き

な期待は持てないと思うが、むしろ化学原料としてもととの構造を生かして有効利用し、かつ副生物を有効利用したり、エネルギー利用して、成功している例もある。ブラジルで某社が循環型技術でアミノ酸を生産している例もある。

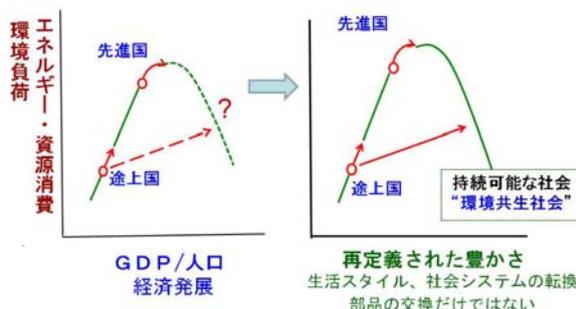
これからのGC Less negative to more positive

エコ効率 = 機能(付加価値) / 環境負荷、コスト



23

新しい環境クズネッツ曲線



これまでのGCとこれからのGC

これまでは、グリーンケミストリーは化学製品を作るために社会あるいは自然に与えた環境負荷を減らすということに力を注いできた。その意味では、Less negative という側面が強かったが、これからは積極的に生活を豊かにするという、More positive な方向を目指すべきではないかと考えている。

そして、今後は、製品やサービス、特に市民生活に近い化学技術を重視すべきであろう。

これまでのように、いかに、どのようなプロセスでものをつくるかということだけではなく、これからは、何を作るか、あるいはなぜそれを作るのか、ということである。今まではコストや環境負荷の2つが注目されていたが、第3の軸を積極的に考えて、快適性とか利便性の価値を考える。そして、環境負荷、化学リスクを小さくして作ることが化学技術の重要なポイントになるのではないかと考えている。

実は、国際化学工業協会協議会の計算によると、化学製品は作る時に出したCO2よりも使用したときの削減量が2倍以上になると結果が出されている。これは良い知らせである。これからは社会の中の部品を交換するだけでは、持続可能社会に軟着陸できないだろう。

環境クズネッツ曲線のUターンを実現するためには、縦軸だけ頑張っても難しいが、横軸の方を頑張れば、実現性があるのではないと思う。あまり我慢しないでも、そこそこに豊かさを感じられるようなライフスタイルやそれにふさわしい社会経済システム、そして、豊かさ(幸福)の再定義や価値観の変革により、持続可能な社会が実現するのではないだろうか。

講演「省エネルギーの展望とそのボトルネック」

東京大学大学院工学系研究科 教授 足立芳寛

我々のチームは、これからの社会の構築にあたり、環境面からデザインするための方法論を開発することを目指している。我が国の将来像については、今回の震災により抜本から再検討する必要がある。

我が国の将来像

2年前につくられた2020年、2030年の我が国の将来像が今回見直されようとしている。

2009年の見通しでは、経済成長率は1.3%を見込み、その後10年間は1.2%の成長、GDPは650から740兆円くらいとなるとしていた。それを支えるためになにが必要かということであるが、幾多の困難な課題が山積する。

まず、エネルギーコストとしての原油の価格は、可採年数の減少に伴い、これから高騰していくだろう。これはドルベースで表しているため、円換算し直した為替レートがどうなっていくか。ここも変動要因である。その他に、人口の減少、高齢人口の増加、世帯数の減少がある。

それから、GDPを支える素材生産、原料であるが、粗鋼の伸びはあるが、国内投資やインフラ投資が少なくなるためエチレン、セメントはそれほど増えない。紙・板紙、業務用床面積、旅客輸送、貨物輸送は増加するだろう。では、これらを満たした解を我々は有するのか、この中のどれかを我慢するのか。つまり、GDPの約500兆を減じていくことの選択を我々ができるのか、所得を減らすことができるのか、という議論になる。

わが国の将来像

	実績		予測	
	1990	2005	2020	2030
実質GDP [00年連鎖価格兆円]	451	540	656	739
原油CIF価格 [\$/bbl]	23	56	121	169
為替レート [¥/\$]	142	113	95	95
総人口 [万人]	12,361	12,777	12,281	11,529
65歳以上比率 [%]	12.1	20.2	29.3	31.8
世帯数 [万世帯]	4,116	5,038	5,357	5,242
労働力人口 [万人]	6,384	6,651	6,467	6,180
素材生産				
粗鋼 [万吨]	11,171	11,272	11,966	11,925
エチレン [万吨]	597	755	706	690
セメント [万吨]	8,685	7,393	6,699	6,580
紙・板紙 [万吨]	2,854	3,107	3,244	3,190
業務用床面積 [億平米]	12.9	17.6	19.3	19.2
旅客輸送量 [億人キロ]	11,313	13,042	13,066	13,066
貨物輸送量 [億トンキロ]	5,468	5,704	6,341	6,344

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座



エネルギー需給像

この議論を支えるのが長期のエネルギー需給見通しである。

経済成長率に必要なエネルギー価格は1バレル120ドルとか170ドルの水準になるのではないか。エネルギー価格が劇的に下がれば良いが、高水準の状況を想定せざるを得ない。

最終的には最先端技術を最大限導入しなければいけないということであり、4つのテーマがあがっていた。30%以上のエネルギー効率の向上、運輸部門の石油依存度80%、石油依存度40%未満、そして原発の比率を30~40、場合によっては50%というものである。

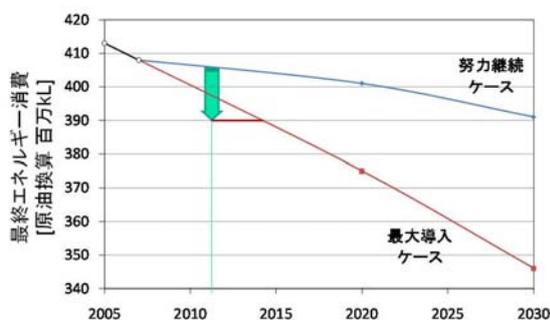
長期エネルギー需給見通し

- 平成21年6月：麻生内閣総理大臣
- 経済成長率
 - 2005年-20年：1.3% 20年-30年：1.2%
- エネルギー価格
 - 2020年 \$121/bbl 2030年 \$169/bbl
- 最先端技術を最大限導入
 - 30%以上のエネルギー効率の向上
 - 運輸部門の石油依存度80%程度
 - 石油依存度40%未満
 - 原子力発電の発電電力比率30-40%以上

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座

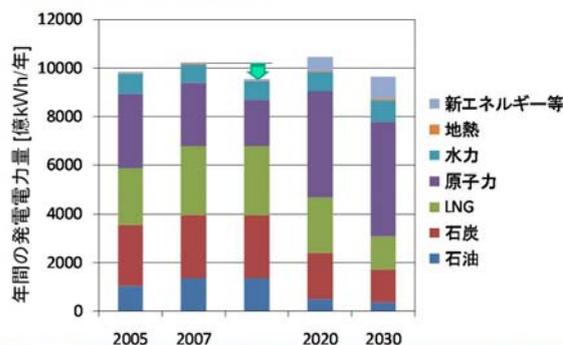


最終エネルギー消費の推移



東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座

電源構成の推移



東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座

2009年の長期エネルギー需給見通しにおいて、最終エネルギーの消費の推移を2030年まで2ケースで描いている。一つは努力継続ケース、もう一つは最大導入ケースである。想定消費量は、約4.1億キロリットルであるが、福島第1、第2原子力発電所が稼働していない状況、他の既存原発の状況を勘案すると、想定より原油換算で10–15百万kL以上不足すると考えられ、相当の節約が必要になる。では、自然エネルギーの導入でどのくらいカバーできるのか。

我々の現在のような生活を享受するためのエネルギー供給量を年間の発電電力量で見ると、1兆億KWhくらいが必要だということになる。

2年前、温暖化効果ガスを減らそうということで、価格圧力がかかり、またリーマンショックの影響もあって発電電力量は減少した。このときには温暖化効果ガスを減らすこと伴った。

現在、問題なのは、2020年、2030年の時点で、2年前の目論見にあった原子力の部分である。

これは温暖化効果ガス対策のためのデザインである。新エネルギーについては、我々は長期には新エネルギーに依存する必要があるというのは論を待たない。しかし、2020年、30年でそれが可能かどうかという大変な困難が予想される。我々にとって、何年かけてどのような世界を描くかという大局的時間軸が重要であるが、メインプレイヤーであった原子力がこのような事態の中で、これから10年、20年のオーダーの中で自然エネルギーへの抜本転換は不可能に近いのだが、これを何とか考えなければいけないとなると、石炭、石油、天然ガスで繋がるを得ない、ということになる。

これには非常に大きな問題がある。まず、高コストエネルギーであり、温暖化効果ガスを多量に発生するエネルギー源である。温暖化効果ガス、気候変動に対する議論をもう一度行うことも必要であるが、我々はエネルギーに多くのコストを支払わなければならない。

グリーン・イノベーション

この状況に対して、グリーン・イノベーションによる早急な対策が求められる。新エネ

ルギーへの転換と省エネルギーの促進である。

短期的には、日本が世界に誇る最先端の省エネ技術を早期に導入することが望まれる。2年前の最大限導入ケースにおいてもグリーン・イノベーションという言葉が出ており、成果も出てきている。決して悲観的な話ばかりではなく、期待も大きく、責務も多い。それに対する課題も明確になりつつある。

これからの議論の論点は「何をなすべきか」「どれくらい程度何時までになすべきか」ということである。

図は09年12月30日に閣議決定された新成長戦略（基本方針）である。

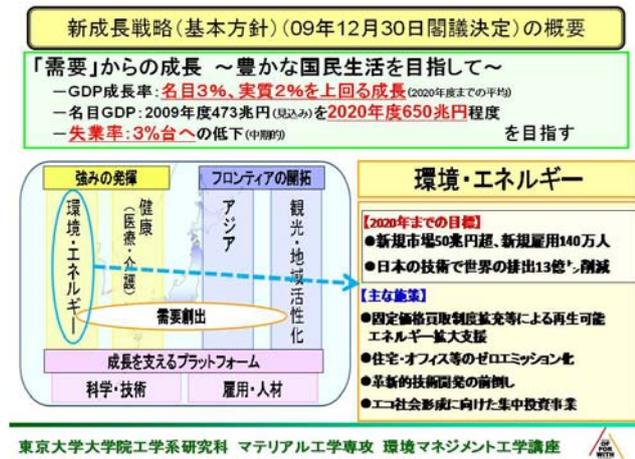
GDP 成長率2%以上、名目 GDP を2020年に650兆円を達成、これが豊かな、我々の目標とする社会だということで、こういう絵を描いてきたが、今回、見直しを行わなければいけない。ただ、この骨格目標は、大きくは変えられない、また変えるべきではないのではないか。抜本的な改正をこの10年で行うことは、相当大きな混乱を生じることになる。我々は震災を乗り越え、この目標の具現化を目指すべきではないか。

この図をベストミックスだと想定されたが、今回の震災を考えるとこれはベターミックスである。予測しがたい事態が多く起こっており、防災面なり何なりで深刻に反省すべき面はあるが、この目標を10年、20年の間に急には変えられないということになる。

では、どうすればよいか。

2009年に「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国 工程表」(抜粋)ということで、技術開発でこれを解決するという具体的なテーマをあげている。

現在も成果は出てきているし、これが今後進められるということで、ここにシフトせざるを得ないということになるかと思う。



グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国 工程表(抜粋)

	2009年度	2010年度	4年以内	2020年
暮らし	- 太陽光発電等の導入補助	- 省エネ基準の強化(建築物・TVなど)	- 家庭・公共施設への太陽光パネルの飛躍的な導入拡大 - 再生可能エネ導入促進のための諸制度見直し	- ゼロエミッション住宅・ビル - LEDや有機ELなど次世代照明100%化 - 再生可能エネの大幅導入
産業	- 低炭素産業への立地補助 - 革新的技術開発の前倒し	- 低炭素産業向けの公的金融支援	- 次世代太陽電池・蓄電池の研究開発	- グリーンイノベーションの世界的拠点化
まちづくり	- 環境配慮型最先端技術によるインフラシステム輸出		- 日本版スマートグリッドと次世代送配電ネットワークの構築	- 日本発の低炭素型まちづくりを世界に展開 - 日本の技術を活用して日本1国分以上のCO2削減

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座

論点を少し絞って新エネルギーの導入見通しについて考える。

自然エネルギーに対する導入の可能性であるが、先ほど4億キロリットルが省エネを考

慮しても当面の必要量だというふうに述べた。2年前の姿では、自然エネルギーは最大限導入ケースより20年で2,400、30年で3,000万キロリットルというところである。

今回、この数字を20%くらいまで上げて4,000万にする、ということである。これができるかどうかということがこれからの課題になる。

2020年のターゲット、20%は目標は高く掲げて、そこに向けてできることを我々としてあらゆる分野から考える必要がある。

GDPの650兆円なり740兆円という我が国の経済規模を達成するためにも、省エネルギー技術の開発、新エネルギーの開発が重要となる。これらの技術は大きなマーケットとなる可能性が大きい。省エネルギー技術の導入の成功事例を日本がモデルとして提示すること

ができれば、世界がそのマーケットを積極的に導入してくれるだろうし、我が国は輸出立国として、技術競争力、国際競争力という観点で非常に大きなポテンシャルを持つことができることになろう。

ただ、新エネルギーについては普及に向けた立地制約や価格などの制約があることも事実である。

また、ソフトの部分としては、スマートグリッドやスマートコミュニティ、スマートコンビナートなどの有望なわが国の得意分野がある。

新エネルギーの導入見通し

太陽光発電
2009年5月長期エネルギー需給見通し:2020年に350万kL
2010年8月総理の中期目標を受け:2020年に700万kL
に上方修正

単位:原油換算 万kL

	2005年度		2020年度		2030年度	
	実績	努力目標 ケース	最大導入 ケース	努力目標 ケース	最大導入 ケース	
太陽光発電	35	140	700	669	1,300	
風力発電	44	164	200	243	269	
廃棄物発電+バイオマス発電	252	364	408	435	494	
バイオマス熱利用	142	290	335	402	423	
その他*	687	707	812	638	727	
合計	1,160	1,665	2,455	2,387	3,213	

*「その他」には、「太陽熱利用」、「廃棄物熱利用」、「黒炭・炭材」等が含まれる。

東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座



2万kW規模のメガソーラ計画

	浮島太陽光発電所(仮称)	扇島太陽光発電所(仮称)
太陽電池出力	約7,000 kW	約13,000 kW
推定発電電力量	約740万kWh/年	約1,370万kWh/年
敷地面積	約11 ha	約23 ha
太陽光パネル設置面積	約10 ha	約20 ha
運転開始予定	平成23年8月	平成23年12月

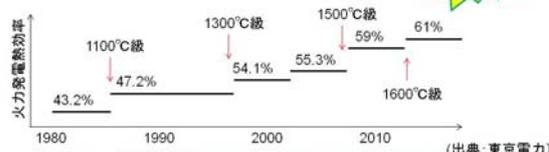
東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座



世界最高のLNG火力発電熱効率 MACC: More Advanced Combined Cycle

- 川崎LNG火力発電所
- 1500°C級 → 1600°C級
- 熱効率 59% → 61% (低位発熱量基準)
- 150万kW × 2% = 3万kW

耐熱材料
の真獻

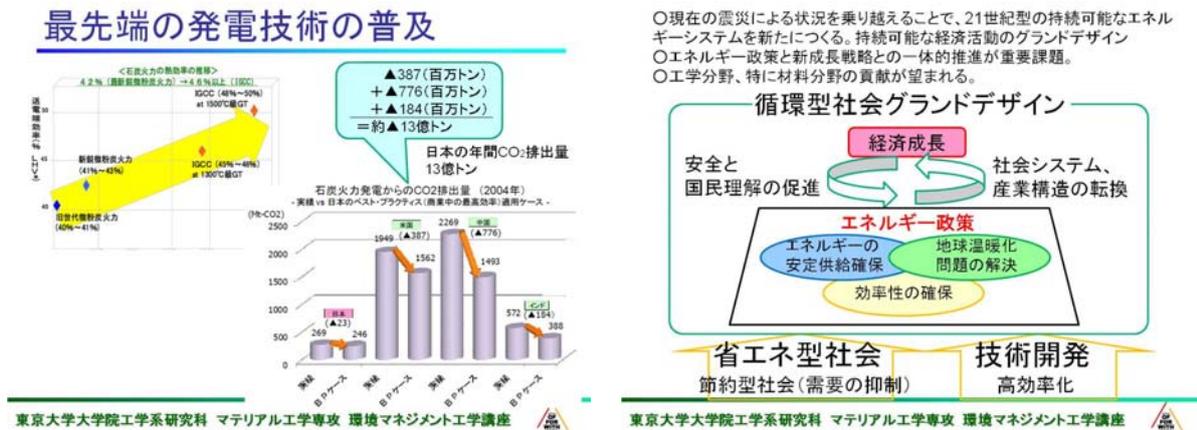


東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 環境マネジメント工学講座



具体的な技術開発の成功例として、神奈川県川崎市では、平成23年8月と12月の運転開始予定で、2カ所で2万kW規模のメガソーラ計画を進めている。もう一つの事例の川崎火力発電所ではLNGによる1500°C級コンバインドサイクルを導入し、当初は熱効率59%を設計目標としたが、さらに1600°C級コンバインドサイクルに向上させ61%の運転に成功し、150万kW級2基が運開している。この2%の向上は、3万kWがネットで浮いてきたということで、メガソーラに匹敵する以上の効果があった。LNGは必要であるが、世界にこれら

の高効率設備が波及できれば非常に大きな効果となる。



この図は最先端の発電技術の普及例である。電事連で計算された結果であるが、米国と中国とインドの火力発電所は今30~40%くらいの熱効率であるが、それがわが国の開発したIGCCの導入に置き換えれば、約13億トンのCO₂のカットができる。13億トンはわが国に総排出量をすべてオフセットすることになる。省エネ型社会をつくることは需要である。豊かさの質の議論が出ているが、今の快適すぎる社会で我々は満足するのか、さらにそれを押し進めるのか、世界に対して日本型モデルとしての豊かさの中身を示す必要がある。その意味で節電社会、節約社会は必要となる。

しかし、産業において節電、節約だけで済むわけではない。日本の今の持てる実力を世界に普及させるシナリオをつくることで、世界にとっての省エネルギー技術の普及は、エネルギー問題、資源問題、温暖化問題の解決に貢献することになる。

そのためには、我が国が発展しなければならない。我が国の発展が新しい技術開発を生むのだから、ここに力を注ぐべきで、全体の成長率の枠組みを変えるとか、直ちに役立たないからといって研究開発投資を逡巡するようなことがあってはならない。

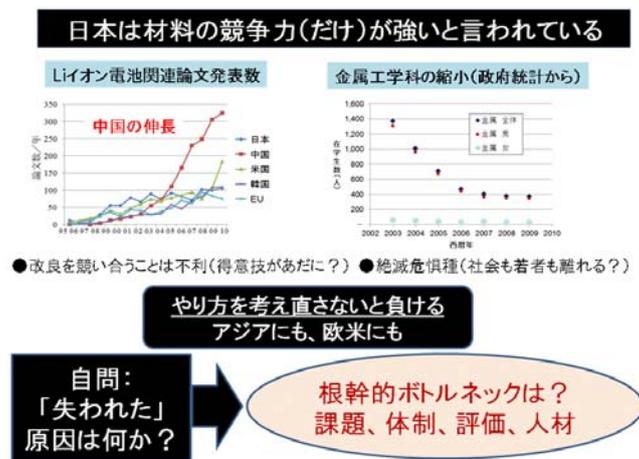
材料開発はその基幹である。材料技術開発についての資源投入、資金投入、またそのための人材育成、社会の枠組みをつくる必要がある。

パネル討論ーグローバル視点での日本がとるべき長期戦略ー

進行役 (長井)

こんにちは。私たちの目論見としては、前半に各展望と課題とご報告があるという前提で考えていたのですが、まさにそのようになったと思います。

このパネルのミッションとしては、パネリストの顔ぶれを見ていただければおわかりかと思いますが、政策側とか産業側からグリーン・イノベーションを実現していくために日本全体としてどういうことを考えるべきかという視点で、それぞれの立場から発言しましょう、ということになってきますが、45分間ということなので、大体しゃべりだすと終わらない人たちがばかりだと思いますので、自制をかけて2回くらいは発言できるようにしようということでお考えしました。



最初に私自身の思いをこの1枚で申し上げたいと思うのですが、いろいろな言い方はあったのですが、日本は、材料が強いんじゃないかと。「日本は材料の競争力だけが強い」と言う方もおられたりして、私自身は非常に気持ち良くなるのですが、褒められて浮かれているとだめだというのはあるのですが、やはり研究の面でも中国の量的・質的な伸長は著しい。これは魚崎先生からいただいたリチウムイオン電池関連の論文発表数の変化ですが、こういうところと改良を競い合うというようなことはもうあり得ないでしょう、ということが特に産業界の方々から言われております。

一方、右側のほうのデータですが、私の出身の金属工学科だけを見ているわけですが、その在校生が政府の統計によるとグググッと落ちて、ついに金属工学科も絶滅危惧種に入ったかということがあるのですが、社会も若者もこういう分野から離れていくのかという、非常に大きな不安にかられています。縮めて言うと、「だけが強い」と言われているところをつぶしてどうするんだ、という話にもなるのですが、おそらくやり方とか考え方を変えないと、「負ける」という表現がいいかもしれないんですが、負ける対象が、アジアにも負けるし、欧米にも負けてしまうのではないかと。一方で、失われた10年というのがあったりして、あえてもう一回、根幹的なボトルネックは何かということで研究課題の作り方とか、研究体制とか、研究評価の仕方とか、人材育成とか、いろいろなものが見方があると思うんですが、そういう大所高所的なお話をきょうはパネリストの方々をお願いいたしました。

そういうことで、第1ラウンド、一人当たり持ち時間5分で、まず論点提供をそれぞれの立場からしていただきましょう。第2ラウンドでは、時間がわかりませんが、我々自身もう一回目を覚まして頑張るべきは何かということは、一人ずつ言っていたら大体時間が来るのではないかと思います。

ご準備いただいた内容からしますと、たぶんこの順番がいいのではないかと思います。最初に柘植先生、その次にトヨタの射場部長、JSTの金子フェロー、それから4番目としては文科省の環境エネルギー課の福井さんという形でそれぞれのご発言をいただきたいと思います。

柘植

柘植でございます。このパワーポイント1枚で私の役を果たしたいと思います。



ボトルネックの視点はさまざまあると思うのですが、私がお説明したいボトルネックは、表題に書きましたように、「知の創造」、今日の話題の場合は材料科学ですが、それと「イノベーション」、すなわち社会経済的価値の創造とを結ぶイノベーションパイプラインネットワークが繋がっていないということがボトルネックである、というのが私のポイントであります。

この図の横軸は、科学技術の領域の広がり、言うなればディシプリンです。研究領域A、研究領域Bで表記しましたが、材料科学や私の専門である機械工学とか、学問領域です。

図の縦軸は、社会経済的価値に向けた価値創造のステップです。一番下がまさに材料科学などの知の創造ステップであります。次のステップが目的基礎研究、次のステップがいわゆる応用研究開発、最後は社会経済的価値創造のイノベーションです。

この縦軸、横軸で書いたイノベーションパイプラインネットワークは非常に複雑であります。例えば、研究領域Aから出てきた新材料を活用したプロジェクトAが、他の技術が成熟していなかったら次ぎのステップに進めなかった事例が多くあります。先ほど話題になったガス温度が1600°Cのガスタービンもそうであります。許容使用温度が900°Cくらい新材料ができたけれども、翼の冷却等の他の技術が成熟していなかったら、今の1600°C級のガスタービンは実現できなかったのです。あるいは、本来の目的に対する適用

は諦めた派生技術が思わぬ製品に、そしてイノベーションにつながったという事例がたくさんあります。あるいは、A ディシプリンと B ディシプリンとが融合して新しいプロジェクトができて、それがイノベーションにつながったり、途中で諦めた技術が派生技術として新サービス、新しいイノベーションに結びついた事例もあります。

もう一つの大事な話は、いわゆる知の創造への立ち返りです。産業側とか、応用研究開発をしている人たちから大学へのバック・ツー・サイエンスです。このメカニズムがあったからこそ、イノベーションが出来上がったという事例が多くあります。このイノベーションパイプラインネットワークは時間軸上では20年～30年の時間で、それから、非常に非線形で確率論的な性質を持つことをこの図は表しております。

そうなりますと、材料科学をイノベーションにつなごうというときのボトルネックは何か、この非線形で確率論的なイノベーションパイプラインネットワークがつながっているか、という点が重要であります。

すなわち大学が中心になっています基礎研究、後ほど教育も出ますけれども、それがこの次のステップの研究開発（大学や研究型の独立行政法人が主に担う）につながり、最後のイノベーション、これはやはり産業の責任であります。ここ記したように、これらの参加者が図に簡単に書いた矢印の様に、互いに有機的に結びついているかが問題です。

さらに、産業側から基礎研究に向かう非線形で、かつ確率論的なパイプラインネットワークが互いにつながっているかが課題です。この点において、日本のイノベーションパイプラインネットワークはつながっていない、これが日本の弱点だと思います。

最後です。図の一番右側に記したように、このイノベーションパイプラインネットワークを持続的に回すためには、教育と研究とイノベーションの三大要素を三位一体的に推進するということをもっと意識して、デザインして回していくことが必要です。それが、今日の論点であります、「材料科学をグリーン・イノベーションに結びつける持続可能なエンジン」をつくらないといけない。これが私の論点であります。以上です。

進行役

どうもありがとうございました。今、先生の教育、研究、イノベーションの三位一体視点を提起していただきました。次は、射場さん、お願いします。

射場

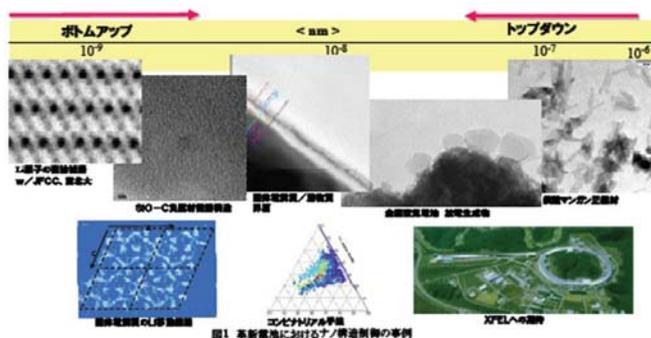
トヨタ自動車の射場でございます。私はトヨタ自動車の電池研究部の電池の研究だけをしているんですけども、出身は金属工学科です。長井さんの最初のお話にあったとおりのことに今なっています。

先日中止になった金属学会で蓄電池のシンポジウムをやる予定でした、そのときに私、お話をさせてもらうことになっていて準備した資料をきょう代わりにお話しさせてもらいたいと思います。

このパワーポイントで言いたいのは、電池の細かい話をここでしても仕方がないですけども、電池の材料は――我々が取り組む革新電池の材料は、全部、ナノ材料だというこ

とです。

昔の電池は、巻けました、できました、みたいな開発だったのですが、今はナノで中の様子を見ながら、どうすれば特性が出るのか。



例えば、この二酸マンガンの正極剤は 20~30nm くらいの粒子ですね。それに 10nm のカーボンをコーティングしないと性能が出ない。それを 20nm つけてしまうとイオン伝導がなくなってしまふみたいなところで制御をしながら研究をする。そういうものは、半導体と違って電池はかなりの体積をもって容量を出さないといけないので、これ、トップダウン的なアプローチではなかなかできなくてボトムアップで安く作るというのがやっぱり一番大きい課題になるのかなと。その後、研究はもっと進んで、東北大の WPI の PLD を使って、JFCC の TEM でリチウムの格子像まで見えるようになりました。こういうところまで見ながらも開発しましょうとなっている。あと金子先生のお話にもあったような、なぜ固体電解質の中をリチウムが動くかみたいなのも第一原理とか分子動力学と組み合わせで計算できるようになってきてしますし、3800 種類の薄膜で組成を作って、計算科学で最適化したらかなり性能のいい電解質が得られて、もう活用の段階に入ってきている。あとスプリングエイトは、NEDO で今電池、蓄電池専用のビームラインを作っていて、弊社もビームラインを 1 つもっていますし、過去に産業利用のビームラインもあって、普通にスプリングエイトを使いながら電池開発ができる状況になっているということで、XFEL もまずはライブでやる、みたいな話になっていますが、ぜひグリーンでも活用していただきたいというふうに考えています。

要は、今までのナノテクの成果を漏れなく活用して、研究開発をしていることを言いたい。

後段のお話ですが、私は電池研究の前は、トヨタで 10 年くらい先端研究の統括をしていました。そのときに役員に説明責任を果たすために、こういうロードマップを作りました。このロードマップは、ここにありますように、風が吹けば桶屋が儲かるような話で、きょうの話題の社会からどんどん製品、部品、材料、それでサイエンスまでブレークダウンするところは、何段階もロジックをブレークダウンしていかないとなかなかつながっていかないということです。

一番最初のところですね。御園生先生のおっしゃるとおりで、今だと「電気自動車は高くて、今の電池ではだめだから革新電池をやります」「革新電池をやるためにはナノ材料をやります」「ナノ材料の研究開発にはこういうサイエンスのブレークスルーが要ります」と

いうことで、風が吹けば桶屋が儲かるストーリーを語れる人はなかなかいない。

今、スプリングエイトが一生懸命見ているのは電極と電解質の界面に膜ができることです。その膜のでき方を解明したらCO2が減るというストーリーを語らないと予算は出ないというふうなことで、風が吹けば桶屋が儲かる、この辺は簡単なんですね、ネズミが桶をかじるとか、ネコが減るとか。だけれども、難しいのは風が吹いて目の悪い人が出て、三味線がいっぱい売れるというところの展開はたぶんすごい展開で、これが本当に起こる確率は何%という、すごい低い確率です。そういうロードマップはなかなか書けないと思うんですけども、風が吹けば眼鏡屋が儲かるとか、風が吹けば目薬屋が儲かるくらいのストーリーを書いて、中には桶屋まで行くのも出るのかなというふうなマネジメントをしていくのかなというふうに思っています。以上です。



進行役

どうもありがとうございました。ご存じの方はご存じだと思いますが、これほど多くの方々、多くのポテンシャルが集中されてやらないと、下と上を結ぶなんていうことはできないというお話でもあったかと思えます。

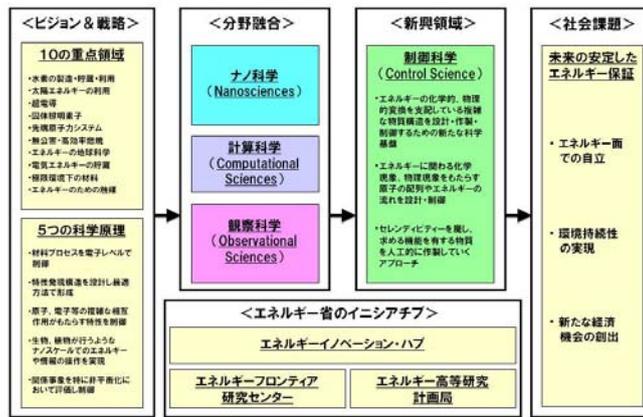
アメリカの動きというのはけっこう気になるんです。ちょうど金子フェローがそこをまとめられたというお話を簡潔にさせていただけるので、よろしくお願いします。

金子

ポイントを数分で申し上げます。アメリカは今、日本に追いつき追い越すために、エネルギー分野の研究力を高める動きをしています。こうした動きを分析した結果を図にまとめています。

一番右に社会課題と書いてありますが、彼らが設定したターゲットは未来の安定したエネルギー保証を実現すること。そのために3つの目標を立てました。第一が、エネルギーの面でアメリカが自立すること。第二が、その自立する方法が環境持続性を持つこと。第三が、これは先ほどの話にも出てきましたけれども、エネルギーはグローバルなビジネスになったので、アメリカはその中で独自の権益を確保する、ということです。

米国が展開する“グリーンイノベーション”のシナリオ



(出典) 米国エネルギー省の各種工場の建設、関連機関との統合結果等に基き、GE-T-CREDSの作成
Japan Science and Technology Agency All Rights Reserved.

この動きのもとになったビジョンと戦略を、彼らは約 10 年をかけてトップクラスの研究者や有識者が延べ 1,600 人参加して作り上げました。その内容が左のほうにありますが、10 の重点領域を掲げています。1 番上の水素の製造・貯蔵・利用から始まって、一番下のエネルギーのための触媒までの 10 領域です。

そして、この中で 5 つの科学原理に重点的に取り組むことを宣言しました。一番目が、材料プロセスを電子レベルで制御すること。五番目の関係事象を非平衡化において評価し制御することは、先ほどの射場さんの話に関係があります。

そして、これらの科学原理を構築するために、いろいろな取り組みの中で、エネルギー省が 3 つのイニシアティブを立ち上げました。エネルギーイノベーション・ハブ、エネルギーフロンティア研究センター、エネルギー高等研究計画局の 3 つです。エネルギーイノベーション・ハブは、特定の領域を対象に 1 カ所に人を集めて基礎から応用まで取り組んでいく仕組み。エネルギーフロンティア研究センターは、ネットワークを作り基礎研究に徹底的に取り組む仕組み。エネルギー高等研究計画局は応用に特化した仕組みになっています。

これらの仕組みを用い、彼らは新たな科学の創出を図っています。コントロールサイエンスと呼ばれていて、ここに緑色で書いてあるものです。エネルギー現象を徹底的に観察することで、求める現象を創り出していく。セレンディピティを排し、必要な機能を生み出そうとしています。

そのために、ナノ科学、これはエネルギー現象を創り出すための科学、それから観察科学、先ほどの話と重なりますがエネルギー現象を明らかにするための科学、これらを徹底的に高めようと。そして、観察したエネルギー現象とナノ科学を結びつけるために計算科学を活かそうと。つまり、ナノ科学と観察科学を計算科学で結びつけようとしているわけです。

これがアメリカの動きです。今はまだ、日本はアメリカの前を進んでいるわけですが、こうした動きを踏まえ、これから何を成すべきかについて 2 点だけ申し上げて話を終わります。

1 つは、アメリカが立ち上げた仕組みの中に、若手研究者がたくさん入りこんでいるこ

とです。調査のために3度現地に入りましたが、このことを強く感じました。なぜ若手研究者が入ってきたのか。それは、ターゲットとなる科学原理を引き出したからだと思いません。つまり、社会課題であるグリーン・イノベーションを実現するために、取り組むべき科学原理を明示した。その結果、若手研究者が集まってきた。これが、申し上げたい1点目です。

もう一つは、ここにいらっしゃる方にもぜひお願いしたいのですが、アメリカが取り組むべき課題や原理を見つけ出す上で、シニア研究者やトップクラス研究者が大きな力を発揮したということです。つまり、皆さんの知恵を結集して、日本がグリーン・イノベーションを実現するために一体どういう科学原理に重点的に取り組んでいくべきなのか、その方向を打ち出すことが非常に大きな駆動力をもたらすと思っています。

進行役

結論まで言っていただきまして、どうもありがとうございました。

では、日本の政策誘導がどうなっているか、皆さん、思われると思っています。我々としては経産省というより文科省の環境エネルギー課の福井さんに来ていただいて、政策誘導側の思い入れをお話していただきます。よろしくお願いします。

福井

本日はこういう機会を与えていただきましてありがとうございます。文部科学省の環境エネルギー課の環境科学技術推進官をやっております福井と申します。

The infographic is divided into several sections:

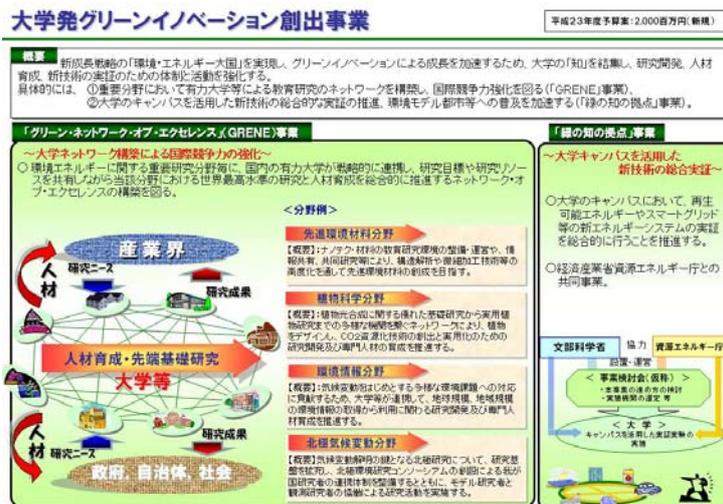
- 新技術の実証・エコ社会形成** (New Technology Demonstration and Eco-Society Formation): Includes programs like 'Green Innovation for Social Realization' (5 billion yen) and 'Strategic Research Promotion' (4 billion yen).
- 革新技术の創出・技術競争力強化** (Creation of Revolutionary Technology and Strengthening Technological Competitiveness): Includes 'Strategic Research Promotion' (4 billion yen), 'Environment and Materials Research' (3 billion yen), and 'AI/IT-based Energy Engineering Research' (1.2 billion yen).
- 人材・グローバル展開** (Human Resources and Global Expansion): Includes 'International Cooperation' (1.34 billion yen) and 'Global Earth Observation' (840 million yen).
- 大学発グリーンイノベーション創出事業 20億円(新規)** (University-led Green Innovation Creation Business 20 billion yen (New)): Includes 'Green Knowledge' (1 billion yen) and 'Green Network' (1 billion yen).

本日はグリーン・イノベーション実現のためのボトルネックについての論点ということですが、ここに書いてありますのは我が課の施策を全般に並べたわけですが、私を感じる問題点を3点、申し上げたいと思います。

ここにあるのは我が課の大体の施策ですが、環境エネルギー課ということで昨年できたわけですが、主に二酸化炭素を減らす緩和技術、あるいは適応技術を推進してございます。

例えば、JST の先端的低炭素化技術開発では、ブレークスルーをもたらすような技術開発をやっておられるわけですが、そんな中で、グリーン・イノベーションというのは、きょうは材料の方が主に参加しておられるわけですが、いろいろな分野が融合していかないと成果が出ない。農学・医学・工学でありますとか、あるいは理学・工学・医学というのものもあるかもしれません。そういう融合を進めようということを我々も推進しているのですが、一番驚くのは、同じ理科系でも工学と理学、学科別でも使っている言葉が違うとか、コミュニケーションが非常に大変だというようなことをよく聞きます。

私も航空工学科を出て工学を勉強した者ですが、そんなに分野とか学会レベル、あるいはジャーナルレベルで全然違うのだというのを聞いて、愕然としまして、そういう学科間の壁を打ち払っていかねばいけないなというふうに思っております。



平成 23 年度から大学発グリーン・イノベーション事業ということで、それぞれの大学が強みを生かしてネットワークを組んでいただけてやっていただくということで、今年から 4 分野で、ここの皆さんですと先進環境材料分野というところの関わりが一番深いかと思いますが、こういうところで、いろいろな分野——材料ですと材料が中心になりますが、いろいろな分野で強みを持った大学がネットワークを組んで、人材育成でありましたり、組織横断的な研究活動を行い、さらに産学連携を推進していただければというふうに思っております。

2 点目ですが、先ほど金子先生から米国の報告がありましたが、これはグリーン・イノベーションだけの話ではないかも知れません。最近、海外に行かれて研究をする、特に若い方があまりいないということを感じます。私は、前職は在ドイツ日本大使館で科学技術のアタッシュをしておったのですが、ドイツも材料ももちろんですし、機械系の研究が非常に進んでいるところで、マックス・プランク研究所等、いろいろなファンドを出して海外の方を呼ぼうとして、我々も日本人の方に来てほしいと思っておったのですが、全然、日本人が増えず、行く研究所、行く研究所、ほとんど中国の人かインドの人が研究しているということでございます。グリーン・イノベーションを日本で実現するためにはやはり他流試合を行わないといけないというふうに思っております、そういう意味では、皆様とか、皆様の部下の方とかが積極的に海外に行かれることがひいては日本の

発展につながるのではないかなと思います。

我々のほうも環境リーダー育成事業とかで海外の方を日本に招いて日本人と一緒に環境の勉強をしていただくというような施策も取り組んでおりますが、私の思いとしてはどんどん若手の研究者の方に海外に行っていただくというのがボトルネックの解消になるのではないかと考えております。

あと最後簡単に、グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業の中でもどういふふう社会に実証されるかというようなことを念頭において研究していただければということで、社会実装を考えた研究というのも重要視していただければと思います。

主に最初の2点が、私はボトルネックになるのかなと思います。以上でございます。

進行役

ありがとうございました。全く予定どおりやっていただきましたので、少し余裕があるんですけども、パネリストの間でお互いにちょっとご質問があったらどうでしょうか。

柘植

先ほどの金子フェローが紹介していただいた米国が展開するグリーン・イノベーション、あれは今福井さんがおっしゃった文科省のシナリオと比較したときに、実はそこで日米の格差があるというのを私は感じます。

先ほど金子フェローの紹介されたものは、基礎研究からイノベーションまでの、さっき私が言いましたイノベーション・パイプラインネットワークが、非線形で確率論的だと言いつつも、持続可能な形で自立的に回るメカニズムがこのシナリオの中に組み込まれているなと思います。まさにその要である、エネルギー・イノベーションハブなどをつくっておられます。そういう点で日米に差があると私は見ます。基礎研究からイノベーションまで結びつけるエンジンとして、あの2枚の絵は、私は象徴的に違っていると思っているんですけども、お二方の意見はどうでしょうか。

金子

違っている面と違ってない面の両方があると思うのですが、日本でもいろいろな手が打たれていると思います。今回の調査でアメリカに入って向こうの人と議論すると、日本の良いところ、優れてところの指摘が出ます。つまり、仕組みの違いそのものよりも、仕組みの中で動く人間のモチベーションやアクティビティ、これがすごく違っているのだと思います。

アメリカの場合、アメリカはエネルギーに弱い、だから何とかしなければいけないと考え、そのために新たなビジョンと戦略を打ち出した。これが、モチベーションやアクティビティを高めている。ですから、今、日本に求められているのは、これまでになかったような、もっとワクワクするようなビジョンや戦略を打ち出すこと、非常に難しい要求ではありますが、これが必要なのだなと思います。

福井

柘植先生がおっしゃったところ、特に日本ですと、省庁間の縦割りとかそういうところにも関わってくるかと思いますが、我々、連携に努めるということで、特に文部科学省は基礎研究のところを担当するというので、できた成果は経産省初め他省庁で実現していただくというのが基本的姿勢だと思います。

そのような連携は、総合科学技術会議を中心に連携をとっていただいていると思っておりますので、先ほどの説明は、我が省の施策というところだけで考えたので、そういう印象かと思うんですけども、そこは他省庁連携を進め、それぞれの持ち場で成果を出さなければいけないと思っていますので、我々は大学とか研究機関の振興に努めたいというふうに考えております。

進行役

どうもありがとうございました。他には、お互いの間でご質問は。

射場

アメリカの施策で、計算科学がけっこう象徴的に出ていたと思うんですけども、私は計算科学というのは単独では存在し得なくて、どれだけ実際の開発の中に入り込んでやるか。計算科学がうまくいかなくても、開発の人と一緒に結果をもってディスカッションするだけで新しい指針が得られるというケースがすごく多いと思うんです。

アメリカでは、そのあたりのリンクを具体的にどうやられているか、もしおわかりでしたら。

金子

私が紹介できるのはスタンフォードの例になりますが、スタンフォードの場合、SLAC という加速器の研究所があって、そこに大型コンピュータ施設が整備されています。スタンフォード大学にナノテクのグループがあり、SLAC の中でいわゆる観察科学のグループが活動しています。さらに、SLAC の中に界面科学&触媒センターという組織が作られ、ここが計算科学を担っています。

まだ始まったばかりですが、実際にセンターのリーダーと会って話をすると、まず観察した結果が自分達のところに入ってくる。それをナノテクのグループに渡し、ナノテクの人達がモデルを作って実験してみる。そして、得られた結果が返ってくる。そこで、観察と実験の間で何が違っていたのかを計算でつきつめる。こうしたことをやりたいのだと。まさに課題と解決策を計算科学がブリッジしている絵を彼らは描いていました。

射場

ありがとうございます。

進行役

よろしいですか。たぶん、今の問題はすごく大事で難しい問題で、日本も日本なりに答えを出さないといけないと思うんですが、ほかにパネリストの間でご質問、大丈夫ですか。

では、ちょっと射場さんにいじわるな質問で、射場さんのお話を聞いているとトヨタは一人で大丈夫だというふうにも聞こえてしまうところもあるんですが、よく読むとそうでもなさそうな気がするんですが、トヨタだけで大丈夫なんですか。

射場

もう一回、私の桶屋のパワーポイントを出してもらおうといいと思うんですけど、何がボトルネックか、話をするのを忘れたので、今言いますけど、明らかに材料システムというところと赤字の新原理、新物質、機構解明、ここの間にサイエンスとエンジニアリングの間のギャップがある、これがボトルネックだと思っています。

弊社は、頑張っても、材料システムのところまでしかブレークダウンができなくて、産学連携でその間をつなぐ取り組みをしっかりとやってうまくいっているんだけど、そこを上手に説明ができていないですね。サイエンスでいっぱい成果が出ていることを取り上げて、材料システムにつないでいる事例も多いんだけど、あまり説明ができていないことが少し残念で、そこをしっかりと説明するようにしていくと、また、次々、というふうな展開になってくると思います。

進行役

その点では、先ほど金子さんがおっしゃった、アメリカは5つの科学原理とかというところに落とし込んで、全米もしくは全世界を動員する体制はつくったというふうに金子さんは思われたわけですね？

金子

実際はもっと複雑だと思いますが、少なくとも仕組みは出来上がっていて、2009年に46のエネルギーフロンティア研究センターが設立されています。このセンターの公募に当たり、どの科学原理に取り組むかを明らかにすることが求められました。プロポーザルに記載することを要求したわけです。各センターがそれぞれ原理を選んでいきますから偏りは見られるかもしれませんが、全体として5つの科学原理に取り組んでいく体制が構築されています。

引き続き、センターの活動がどのような成果をもたらすのか、各センターの成果をどのようにインテグレートしていくのかを見ていく必要がありますが、アプローチとしてはその通りです。

進行役

柘植先生の前に出るとビクビクしちゃうんですが、この場で(笑)、私もある意味では柘植先生と同じ思いをしているんですが、大学教育、けっこう考えてね、とおっしゃっているように聞こえるんですけども、その辺、ズバリ、もうちょっと先生のお気持ちを。

柘植

最後の3分間で、もう一回先ほどのパワーポイントを見ていただきます。

まさに、長井先生がおっしゃったところが、私の2番目の論点であります。この図で示す非線形で、確率論的なイノベーションパイプラインネットワークが日本はできていないのです。もう一つ忘れてはならないのは教育であります。あえて基礎研究のところに教育を書きました。それから、研究開発型の部分にも教育を書きました。それから、社会経済的な価値をつくるイノベーションのところにも教育と書きました。この教育は、私は育つ人材の像が違う。しかし、大学は教育活動の一環でこの3つの違う人材育成に向けた教育をしていますか？学生の資質に合ったメニューで育てていますか？私は日本の大学では育てていないと思います。大学の先生は、学術の中で生きていますので、やはり学術という面の立場からの教育に重点を置かざるを得ない。ですので、どうしても基礎研究の教育の分野の人を育てるようにならざるを得ない、これはよく私はわかります。

しかし、それぞれのステージの教育というものを、もっと意識的にきちんと設計された形でしていかないとはいけません。私の今日の結論は「教育と研究とイノベーションの三位一体推進」を大学は産業と協働して実践すべきであることです。福井さんを責めるわけではないのですけれども、日本は科学技術行政の中に、“人材育成”という言葉は出るんですけども、その中に教育という言葉は文部科学省と一緒に使うのをためらう体質があります。これはよくご存じのとおり歴史的背景がありますが、しかし、その明治以来の歴史を壊してでも、“教育”という言葉は“科学技術とイノベーション”の中に入れて、三位一体的に進めるべきである。それが私のポイントであります。

進行役

どうも先生ありがとうございました。では、返す刀ではなくて、私、さらに助太刀で福井さんに、学科間の壁が実際にあるのではないかということをおっしゃったのは、全くここにおられる方々はほとんど同感されていると私は思うんですが、福井さんの的にはその壁を取っ払うにはどうしたらいいというふうに密かに思っているんですか。

福井

壁を取っ払うというのは、取っ払わなければならないような状況に追い込むしかないのかなというふうに思っていて、我々がお願いするような研究開発プロセスでも、必ず他分野の人と一緒にやらなければならないような形で応募していただくとか、選定していただく方にそういった形でお願いするとか、一案になると思います。

先ほどの中でも、データ統合解析システムというものを使っているいろいろな適応策を考えるという施策があるんですが、そこで地球観測情報を軸にして、農業とか生物多様性の方とか、地球観測の方がいろいろ連携して、いろいろなアイデアが浮かんで来て、ほんとうに異分野融合して良かったという話をよく聞いています。是非そういった形で挑戦してい

ただければというふうに思っています。

ただ、話を聞いていて、論文を出したときにそういうものが評価される仕組みというのが学会のほうにないような感じがしますので、そこも考えていただければと思います。

進行役

ちゃんと注文をつけていただきました。大変ありがとうございました。大体、予定の締める時間になったんですが、そんな感じでよろしいでしょうか。

では、最初に挙げた方と野城先生。

フロア（佐藤）

JFE スチールの佐藤と申します。聞きたいことがあるんですが、その中で金子先生のアメリカの戦略の図の中で、「セレンディピティを排する」というキーワードが目にとまりまして、基礎科学、原理原則から攻めていこうという、非常に高邁な理想だと思うのですが、一方で、民間企業におりまして、私も電子顕微鏡をやっているのですが、できるだけ原理原則からものを作っていきたいという野望は持っているのですけれども、やはりセレンディピティのクロスセクションを上げていく、いろいろなトライをやって、何かいいものを見つけるといのが材料科学、物質科学の今までの成功例だったように思っていて、セレンディピティを排するより、むしろ日本はセレンディピティをたくさん見つけるようなトライをしていくほうが、まだ我々そこまで賢くないので、そのほうがいいのではないかと感じたんですが、それについて、日米の違いについての違いですけれども、考え方を教えていただければと思います。

金子

そこがポイントだと思うのですが、一つは、アメリカの研究者がすべてセレンディピティを排しているわけではありません。ただ、全体の動きをアクティベートするために、セレンディピティを排するという宣言を報告書の形できちんと示しました。コントロールサイエンス、つまり、エネルギー現象を徹底的に解明し、自分達で現象を創り出すことを目指しているわけです。一方で、この3月の会合でも、コントロールサイエンスは難しすぎて実現できないという人も存在します。

繰り返しになりますが、日本はエネルギーの分野で進んでいます。材料のポテンシャルもあります。ですから、アメリカのこうしたアプローチを頭に入れながら、日本の強みを活かした展開をしていけばいいというふうに考えます。

フロア（佐藤）

ありがとうございます。

進行役

野城先生。

野城

お話を聞いていて大変勉強になり、ありがとうございます。金子先生にアメリカの意図しているところが、変なたとえなんですけれども、そういう理解でいいのかということを確認したいんですけれども、バレーボールの話なんです、私の高校時代の体育の先生が4回つきバレーボールをやってくれたんですね。なぜかという、多くの体育の先生はレシーブとトスとスパイクの練習を基礎だということで、うまくいかないと徹底的にそれをやるんですけれども、永遠にゲームが繋がらず、まして時間差攻撃が出てこないんですが、そんなのはいいと。4回つきで、必ずどこかレシーブとスパイクの間に、もう一回くらい何かブリッジをする、ずっとやっていると4回のうち、みんな連携がわかっていて、そしてすごい連中になると時間差攻撃までするようになって、それでできたときにほんとうに連携よく送っていく。

アメリカがやろうとしているのは、連携をすることを、まず成功体験をするようなことを埋め込んで、やることは我々と同じように、我々もレシーブ、スパイクをやっているんですけども、エレメントはあるんですけども、連携をあえてそこに入れようとしている戦略をやっているのではないかと想像したんですが、そういう理解でよろしいでしょうか。

金子

説明すると長くなるのでポイントだけですが、結果として10年かけて戦略を作ったという状況があります。この動きは、エネルギー分野の基礎研究でアメリカは非常にいい成果を出しているにもかかわらず、それがイノベーションにつながらないという問題意識から始まりました。

先ほどの話と少し違って聞こえるかもしれませんが、問題を克服するビジョンと戦略を作るために、10年かけて1,600人の研究者が参画したわけです。そのプロセスは当時のアメリカにしてみると、3回じゃなくて4回打てるバレーをしたようなことになっている。それで、今のビジョンができた。

私たちが現地に入ったのは2年前からですけれども、拠点リーダーに話を聞くと、こうしたビジョンが共有されていました。我々は基礎研究に取り組んでいるけれども、この基礎研究は太陽電池のエネルギー利用効率を10倍にする、コストを10分1に下げることにつながるのだというようなことを主張するわけです。4回のバレーボールというのは、こうした形で組み込まれているのだと思います。

進行役

一応、スケジュールどおりの時間にきたので締めに入らせてもらいます。本当はもっと時間をとってディスカッションすべき課題がたくさんあるということを承知の上で、大変申しわけないんですが、最後に私のほうからパネリストの方々にちょっときついことを言わせてもらって、もし自分がコミットするとしたらこれだけはやりたいという1つのことを順番に、福井さんのほうから、最後に柘植先生にまとめてもらいましょう。

福井

今、環境エネルギー課では、グリーン・イノベーションを推進していますので、何か日本発の世界に誇れる技術みたいなものを生み出せる仕事が手伝えればというふうに思っています。

射場

私は、サイエンスとエンジニアリングをつなぐのは人でしかないと考えているので、今、大学でとことんサイエンスをやって、電池のネタを持ってうちの会社に入ってくれた人たちがいっぱいいるので、そういう人たちが今研究をして、電池を作って車に載せるところまでしっかりリードして、そうしたら最高のエンジニアになると。実現したいと思います。

金子

私はアメリカの話をしたので、関連してもう一つ。

エネルギーイノベーション・ハブについて、2012年度の大統領予算教書の中に、クリティカルマテリアルをテーマとするハブ設立の計画が盛り込まれました。これは、エネルギーに必要な戦略材料を自ら創り出そうとする動きです。

今日ここでも日本での動きについて議論がありましたが、材料は日本の強みなので、こうした動きをさらに強化していく必要があると感じています。

柘植

3人のことをまとめるという視点を持ちながら、私自身はきょうの命題であるグリーン・イノベーションを実現するための材料研究課題、いわゆる材料科学の課題ですね。これを普遍化すると、日本の持続可能なイノベーション創出能力を強化する普遍的な方策が見えてくることです。その要は、繰り返しですが、「教育と研究とイノベーション」の三位一体的推進であります。

それを文部科学省の共通語にしていくのが私の使命だと思っております。福井さん、力を合わせましょう。

進行役

どうもありがとうございました。たぶん、このシンポジウムそのものも皆さんお気づきの点があると思うのですが、学術会議の3部の中で、材料に関わる幾つかの委員会が一緒になってやってきて、一緒になって考えていこうということで、このシンポジウムを開かせていただいております。

そういう点で、私も最後に何か言わないとかっこ悪いと思うのですが、そういう点では、私も柘植先生のおっしゃっていることにはかなり賛成で、工学というか、エンジニアリングというんですか、これを一度、別に材料という立場だけではなくてエンジニアリングとは何かということを見直す中で、本当の、これからの役に立つエンジニアを育てるとい

とに、何らかのコントリビューションができるといいなと思っております。
そういう形でどうもありがとうございました。(拍手)