2A10

# 技術予測の変化と差異

○塚原修一（国立教育研究所）

## 1．科学技術庁の技術予測調査

技術予測の代表的な事例のひとつとして、科学技術庁による調査があげられよう。この調査は1971年からほぼ5年毎に実施され、1996年に第6回調査が行われた。日本は技術予測を組織的・継続的に行っている恐らく唯一の国であり、これらの調査結果は貴重である。それにもかかわらず、このデータを活用した分析はあまり見かけない。ここでは、その試みの一端について述べる。

科学技術庁の技術予測はデルファイ法によって行われている。デルファイ法はパネル調査法（同じ対象者に2回以上にわたって継続的に行う社会調査）の一種であり、長期的未来予測など、十分に確立された科学的理論が存在しない現象を取り扱う場合に、専門家の意見を基礎として推論の質を改善する方法として、1963年から翌年にかけてアメリカのランド研究所で開発された。

その内容は、推定値（たとえば、特定の科学技術がいつごろ実現するかという予測）について専門家の意見が一致しないときに、意見のフィードバックをはさんだ一連の質問を反復して意見を収斂させ、最も信頼できる推定値を得ようとする手法である。意見のフィードバックは、前回の集計結果を提示する方式で行うことが多い。回答者は、全体的な回答傾向を参考にして前回の回答を変更してもよい。そのさい、回答に確信のない者は多数意見に同調すると考えられるので、意見の収斂が期待されるのである。

しかしながら、これまでの技術予測の結果をきわめて大雑把に要約すれば、回答者の予測結果はおおむね一致するが、完全に一致するわけではない、と言うことになろう。予測に影響を及ぼす要因として、当初から重視されたのは回答者の専門性であった。以下では、技術予測の回答に差異をもたらす別の要因として、回答者の立場によるちがいを取り上げてみたい。要旨集には太陽電池の事例についてのみ記述し、その他の事例については口頭で報告する。

## 2．太陽電池の技術予測

太陽電池は、1960年代には宇宙用の電源として研究開発が行われたが、1973年に石油危機が発生すると、地上用のエネルギー源として期待が高まった。使用目的の変更にともない、それまでの性能優先から生産費用の低減が最大の課題となった。太陽電池に関する日本の研究開発はこの時期に本格化し、サンシャイン計画の一環として取り上げられた。結果として日本は、1974年から92年までの間にワットあたりの生産費を2桁ほど低下させることに成功した。これによって太陽電池の生産量は世界的に拡大したが、なかでも日本の伸張は著しく、1985年から92年まで世界一の生産量をあげていた。

科学技術庁の技術予測調査は、夢物語のような未来的課題を対象とするものではなく、近い将来に実現しそうな課題を予測の対象とする。そのため、一般に、予測の対象となる課題そのものが時代とともに変化する。太陽電池もその例外ではなかった。

(1) 1971年調査と1976年調査

技術予測調査において、太陽電池は複数の分野の課題として取り上げられていた。一方、前述したように、太陽エネルギー利用技術への期待は一貫していたが、その位置づけは時代によって変化していた。そこで以下では、太陽電池にかかわる予測結果の時間的変化と、分野による差異とに注目する。

太陽エネルギー利用に関する1971年調査と1976年調査の項目は、それ以降のものとは大幅に異なっていた。技術予測の第1回にあたる1971年調査では、工業・資源部門に「人工衛星方式を用いた太陽光による発電所（出力100万kW程度）が設置され、地上にミリ波で送電することが実現する」という項目が取り上げられた。この課題の重要度が「大」と回答した者は5％、実現時期については、2005年以降まで実現しないという予測結果になった。

第2回にあたる1976年調査でも、ほぼ同様な項目がエネルギー分野で取り上げられたが、このときの質問文では、発電所の出力が「100万kW程度」から「数万kW程度」に変更された。この課題の重要度が「大」と回答した者は4％、実現時期の中央値は2005年であった。同文の質問項目が宇宙開発分野でも取り上げられたが、こちらでは、重要度が「大」と回答した者は49％、実現時期の中央値は2003年であった。すなわち、実現時期の予測はおおむね一致していたが、重要度の判断は分野によって大きく異なっていた。さらに、工業生産分野では、「変換率が20％以上で価格が現在の1000分の1以下の太陽電池材料が開発される」という課題が取り上げられた。これについて、重要度が「大」と回答した者は88％、実現時期の中央値は1995年であった。

以上を要するに、1971年調査においては、太陽光発電はもっぱら宇宙における発電と位置づけられ、実現可能性が不確定な未来技術であると予測されていた。1976年調査においても、宇宙における太陽光発電は、宇宙開発分野では重視されたが、エネルギー開発の課題としては重視されなかった。その一方、工業生産分野では、安価な太陽電池の開発が実現可能性の高い重要課題と認識されていた。

(2) 1982年調査

第3回の技術予測は、1981年から82年にかけて行われた。この時も、前回にひきつづき、宇宙発電に関する項目が取り上げられた。第2回とほぼ同じ「人工衛星方式を用いた太陽光による発電所（出力数万kW程度）が開発され、地上にマイクロ波で送電することが可能となる」という課題に対して、エネルギー・鉱物資源・水資源の分野では、重要度が「大」と回答する者が8％、実現時期については、2010年まで実現しないという結果になった。宇宙分野では、同文の課題に対して、重要度が「大」と回答する者が51％、実現時期の中央値は2008年であった。通信・情報・エレクトロニクス分野では、これと同趣旨の「巨大な太陽電池板をもつ宇宙空間太陽光発電所が建設され、電力がマイクロ波で地上に伝送されるようになる」が取り上げられた。こちらは、重要度が「大」と回答する者が54％、実現時期の中央値は2009年であった。

エネルギー・鉱物資源・水資源の分野には、このほかにも太陽エネルギー技術に関する項目が盛り込まれていた。まず、「太陽光発電技術が普及する」という項目に対して、重要度が「大」と回答した者は30％、実現時期の中央値は2002年であった。回答者によるコメント例は、「太陽電池の低コスト化が前提となる。新しい高能率素子の開発が先決である」となっていた。また、「太

陽エネルギーを利用した、電池による発電、冷暖房、給湯も含めた、ソーラーシステムによる住宅（個人、集合）が普及する」という課題については、重要度が「大」とする者は28%、実現時期は1998年であった。これらに対して、「1万kW以上の太陽熱発電所が実現する」は、重要度が「大」とする者は10%、実現時期の中央値は2003年であった。これには、「砂漠での利用を考えてはどうか」とのコメント例が付されていた。

バイオマスについては、「バイオマスからのアルコール燃料利用が普及する」という課題について、重要度が「大」とする者は9%、実現時期の中央値は2001年であった。これには、「バイオマスは海外への技術協力にのみ使われる。国内では、海洋バイオマスのみが可能性をのこすが、リスクを伴うから着手されないだろう」とのコメント例が付された。このような在来型のバイオマスとは別に、「エネルギー植物を含めて光合成を利用した太陽エネルギー固定技術が開発される」という課題も予測の対象になっていた。これについては、重要度が「大」とする者は15%、実現時期の中央値は2003年であった。「技術的な不確定要素があまりにも大きい」とのコメントが付され、同じバイオマスでも、こちらは基礎研究段階にあるとみなされていた。

一方、材料・素子分野では、「変換効率20パーセント以上の太陽電池材料が実用化される」という課題が取り上げられた。この課題の重要度が「大」とする回答は86%に達し、材料・素子分野の60課題のなかで最も多かった。実現時期の中央値は1993年であった。また、「変換効率8%以上の大面積アモルファスシリコン太陽電池が実用化される」という課題は、重要度が「大」とする者が81%で、材料・素子分野の3位を占めた。実現時期の中央値は1990年であった。回答者のコメント例をみると、材料・素子分野では、いずれも努力目標と言うよりは、視野に入っている目標として認識されたようにみえる。

以上の結果は、次のように要約されよう。

(a) 太陽電池による宇宙発電は、宇宙開発分野の一環として高く評価されていた。

(b) エネルギー・鉱物資源・水資源の分野では、太陽電池の重要度はそれほど高くなく、将来性が不透明な研究開発段階の課題とみなされていた。太陽熱発電やバイオマスなど、それ以外の太陽エネルギー利用技術はさらに重要度が低く、しかも、国内での実現可能性が乏しいと判定されていた。

(c) 材料・素子分野では、太陽電池という課題の重要度がきわめて高く評定され、調査で提示した課題は、実現可能性がすでに視野に入っているように見受けられた。すなわち、所属する分野によって、見通しが異なっていた。

(3) 1985年調査と1991年調査

1985年調査では、物質・材料・加工分野に「変換効率が50%以上の積層太陽電池材料が実用化される」という課題が取り上げられた。この課題について、重要度が「大」とする回答は77%を占め、実現時期の中央値は2004年であった。また、「変換効率20%以上の大面積アモルファス・シリコン太陽電池が実用化される」という課題は、重要度が「大」とする回答が69%、実現時期の中央値は1998年であった。

エネルギー分野では、「セル変換効率12%以上の大面積アモルファス・シリコン太陽電池が実用化される」という課題に対して、重要度が「大」とする回答者は45%、実現時期の中央値は2001

年となった。「太陽エネルギー、地熱等の自然エネルギーを利用したエネルギー自立型の建築物や住宅が実用化される」という課題については、重要度が「大」とする回答者が24%、実現時期の中央値は2003年であった。

1991年調査では、材料・プロセス分野に1985年と同文の「変換効率が50%以上の積層太陽電池材料が実用化される」が取り上げられた。これについて、重要度が「大」とする回答者は80%、実現時期の中央値は2009年であった。また、これも1985年と同文の、「変換効率20%以上の大面積アモルファス・シリコン太陽電池が実用化される」という課題は、重要度が「大」とする回答者が71%、実現時期の中央値は2004年であった。

エネルギー分野では、「変換効率20%以上の大面積薄膜太陽電池が実用化される」という課題が予測の対象とされた。これは、1985年の質問文の「セル変換効率12%」を「変換効率20%以上」に改訂したものである。またこれは、材料・プロセス分野の質問文の、「大面積アモルファス・シリコン太陽電池」を「大面積薄膜太陽電池」に改めたものでもあり、材料を特定せずに範囲を拡大したものとなっている。この課題に対して、重要度が「大」とする回答者は68%、実現時期の中央値は2004年であった。

以上を要するに、1985年調査と1990年調査においては、材料分野における太陽電池の重要性は高いまま推移し、エネルギー分野における太陽光発電の重要性が顕著に高まったといえる。

(4) 1996年調査

1996年調査では、材料・プロセス分野に、85年、91年と同文の2つの課題が取り上げられていた。「変換効率が50%以上の積層太陽電池材料が実用化される」は、重要度が「大」とする回答者は83%、実現時期の中央値は2016年であった。「変換効率20%以上の大面積アモルファス・シリコン太陽電池が実用化される」は、重要度が「大」とする回答者が82%、実現時期の中央値は2011年であった。前回と比べて、どちらも重要度の評価がやや高まり、実現時期が遅れている。

エネルギー分野では、91年と同文の「変換効率20%以上の大面積薄膜太陽電池が実用化される」という課題に対して、重要度が「大」とする回答者が57%、実現時期の中央値は2013年であった。前回と比べて、こちらは重要度の評価がやや下がり、実現時期が遅れている。このほか、エネルギー分野には、より特定化された課題が盛り込まれていた。すなわち、「砂漠地帯で100MW級太陽光発電システムが実用化される」については、重要度が「大」とする回答者は12%、実現時期の中央値は2016年であった。また、「メガワット級海上太陽光発電システムが実用化される」については、重要度が「大」とする回答者は22%、実現時期の中央値は2018年であった。

以上を要するに、1996年調査においては、前回と対比した同一課題の予測結果は、実現時期の遅れとしてあらわれていた。そのほか、太陽光発電の形態をより特定化した科学技術課題が調査対象に取り上げられていたが、こちらは、太陽光発電が実用化により近づいたことを反映したものと考えられる。

### 3．技術予測結果の総括

これまでの予測結果を、材料系分野とエネルギー系分野に区分して整理すれば表のようになる。ここから次のようにいえよう。

表　太陽電池に関する技術予測の主要な結果

| 技術予測の実施年と科学技術課題の特徴 | 材料系分野の予測 | | エネルギー系分野の予測 | |
|---|---|---|---|---|
| | 重要度「大」の割合 | 実現時期 | 重要度「大」の割合 | 実現時期 |
| 1971年 | | | | |
| 人工衛星方式で出力100万 kW | 5％ | 2005年以降 | | |
| 1976年 | | | | |
| 人工衛星方式で出力数万 kW | | | 4％ | 2005年 |
| 変換率20％で価格が1/1000の材料 | 88％ | 1995年 | | |
| 1982年 | | | | |
| 人工衛星方式で出力数万 kW | | | 8％ | 2010年以降 |
| 変換効率20％の太陽電池材料 | 86％ | 1993年 | | |
| 変換効率8％の大面積アモルファス電池 | 81％ | 1990年 | | |
| 太陽光発電技術の普及 | | | 30％ | 2002年 |
| 1985年 | | | | |
| 変換効率50％の積層太陽電池材料 | 77％ | 2004年 | | |
| 変換効率20％の大面積アモルファス電池 | 69％ | 1998年 | | |
| セル変換効率12％の大面積アモルファス電池 | | | 45％ | 2001年 |
| 1991年 | | | | |
| 変換効率50％の積層太陽電池材料 | 80％ | 2009年 | | |
| 変換効率20％の大面積アモルファス電池 | 71％ | 2004年 | | |
| 変換効率20％の大面積薄膜電池 | | | 68％ | 2004年 |
| 1996年 | | | | |
| 変換効率50％の積層太陽電池材料 | 83％ | 2016年 | | |
| 変換効率20％の大面積アモルファス電池 | 82％ | 2011年 | | |
| 変換効率20％の大面積薄膜電池 | | | 57％ | 2013年 |

(1) 人工衛星方式の太陽光発電は、材料系分野とエネルギー系分野のいずれにおいても重要度の評価が低かった。

(2) 人工衛星方式ではない太陽電池の課題が材料系分野に登場したのは1976年以降であり、エネルギー系分野に登場したのは1982年以降であった。これらの課題に対する重要度の評価は、材料系分野では今日まで高いまま推移した。エネルギー系分野では、課題の内容が時期によって異なるので正確な比較はできないが、当初は低かった重要度の評価が高まっているようにみえる。

(3) 1985年以降の調査には、同一ないし類似の課題が含まれていて、実現時期の予測値を比較できる。材料系分野とエネルギー系分野を比べてみると、実現時期の予測値はかなりよく一致していた。また、分野によらず、調査時点が新しくなるほど実現時期の予測値が未来の方向へ推移する傾向があった。

## 4．考　察

(1) 石油危機以降の太陽電池の開発史は、生産費を下げる努力の過程であった。前述した生産費の画期的な低下は、初期の宇宙用太陽電池が性能優先の高価なものであったことを考慮に入れても印象的である。クリーンなエネルギー源として社会的にも期待された、望ましい技術の開発に成功した事例であると言ってよかろう。それにもかかわらず、現状において、太陽電池がエネルギー供給の大きな部分を担うとは期待されていない。こちらの立場からみれば、今後ともよりいっそうの開発努力が必要であるということになろう。

(2) 技術予測については、予測結果の時間的変化と分野別の差異に注目したが、前者は質問項

目のちがいにあらわれていた。すなわち、科学技術庁の技術予測が、近い将来に実現しそうな課題を予測の対象とするために、課題そのものが時代とともに変化していた。太陽電池の場合、太陽光発電所の出力や太陽電池の変換効率が、後の時期ほど大きくなっていた。一方、分野別の差異については、材料系分野とエネルギー系分野の対比が顕著であった。材料系分野では、早い時期から太陽電池の重要度を高く評価していたが、エネルギー系分野では、最近になってから重要度を高く評価するようになっていた。

(3) 技術予測の結果に影響を及ぼす要因として、当初から重視されていたのは回答者の専門性であった。実際、調査のなかでも、個別の科学技術課題に対する回答者の専門的知識の水準（専門度）を大・中・小・なしの4段階で自己判定させ、専門度が「なし」と回答した者を除外して予測の質問をしている。しかも、最近の近藤らの研究によれば、専門度が「大」と「中」の者に限定したほうが予測の信頼性が高まるという。このような専門性のちがいが材料系分野とエネルギー系分野の相違をもたらした可能性も否定できない。しかし、重要度に対する両者の評価が大幅に異なることからみて、専門性の違いだけによって差異を説明することは難しいようにみえる。

(4) ここでは、予測結果に影響を及ぼした別の要因として、材料系分野が太陽電池の開発者（供給者）であり、エネルギー系分野がその利用者（需要者、受容者）であるという立場の違いに注目したい。この解釈にもとづけば、開発者は当初から太陽電池の重要性を強く認識し、利用者は、開発が成功に近づいた段階で重要性を認識するということになる。これをあえて一般化してみれば、技術開発の成果があらわれた段階では開発者と利用者の評価が一致するが、それ以前の段階では両者に大きな乖離があるということであろう。この解釈が正しければ、技術予測の相違を生み出した要因は情報量の格差ではない。したがって、啓蒙活動など、情報提供によって両者の乖離を解消しようとする方策には限界がある。とすれば、科学技術にかんして意見（ここでは予測結果）が一致しない場合に、どちらの意見が正しいかを議論するばかりでなく、立場によって意見が乖離ないし対立することを前提として、共存を図るような方向がめざされるべきであろう。

## 文　献


Helmer, Olaf, *Social Technology*, Basic Books, 1966. 香山健一（訳）『社会工学の方法』日本経済新聞社、1969年。

科学技術庁計画局『技術予測報告書』1971年、1977年、1982年。

科学技術庁科学技術政策局『日本の技術——1987年～2015年』財団法人未来工学研究所、1987年。

科学技術庁科学技術政策研究所、財団法人未来工学研究所『2020年の科学技術』財団法人未来工学研究所、1992年。

科学技術庁科学技術政策研究所、財団法人未来工学研究所『2025年の科学技術』財団法人未来工学研究所、1997年。

近藤悟、廣松毅「デルファイ技術予測の専門度からみた信頼性分析」『研究 技術 計画』11巻1/2号、89-105頁、1997年。

塚原修一「科学技術史と社会調査」『科学技術史』第1号、125-141頁、1997年。



**謝　辞**　本報告にさいし、科学技術庁科学技術政策研究所の桑原輝隆総括上席研究官から資料のご提供をいただきました。深く感謝いたします。