CO₂ レーザによる Si および Si₃N₄ 表面酸化 反応層の形成と表面層の除去機構*

土屋八郎** 後藤英和** 森 勇蔵*** 広瀬喜久治†
遠藤勝義*** 山内和人*** 宮崎 眞** 西 雅文††

CO₂ Laser-induced Surface Oxidation and Etching of Si and Si₃N₄

Hachiro TSUCHIYA, Hidekazu GOTO, Yuzo MORI, Kikuji HIROSE,
Katsuyoshi ENDO, Kazuto YAMAUCHI, Makoto MIYAZAKI and Masafumi NISHI

A 30 W CO₂ laser was used to perform localized etching on Si and Si₃N₄ coated with an aqueous KOH solution. According to Fourier transform infrared reflection absorption spectrometry, the surface of Si coated with an aqueous KOH solution is oxidized by CO₂ laser beam irradiation, but the spectrum is different from one oxidized without chemical enhancement by KOH. Surface photo voltages which depend on the energy level and the density of surface electron states were measured in order to characterize the oxidized Si surfaces formed with chemical enhancement by KOH. Local density of electron states of model oxidized Si surface structures were calculated using the recursion method and semi-empirical tight-binding theory, and the mechanism of the etching process was investigated. The following results were obtained. The oxidized surface layer has a higher density of defects than one formed without enhancement by KOH. Accordingly, the atomic binding energy in the oxidized layer is decreased, and low power laser etching can be possible.

Key words: carbon dioxide laser, etching, silicon, silicon nitride, hydro-oxide potassium aqueous solution, Fourier transform infrared reflection absorption spectrometry, surface photo-voltage, semi-empirical tight-binding theory, recursion method, local density of electron states

1. 結 言

レーザを何らかの反応性気体中、あるいは液体中に置かれた固体試料表面に照射し、光学的あるいは熱的に化学反応を誘起、または促進させることによって、局部的な除去加工を行うことが可能であり、多くの研究報告がなされている^{1)~3)}。そのような加工法の一つとして、KOH 水溶液中に置かれた試料に、Ar イオンレーザあるいは YAG レーザを照射する方法があり、Si 単結晶や Si₃N₄ 焼結体などのセラミックスに対して有効であることがわかっている^{4)~6)}。また、Si₃N₄ の電解放電加工においても、KOH 水溶液の化学的効果が確認されている⁷⁾。一方、筆者らは Si₃N₄ 表面に

KOH 水溶液を塗布することにより、本来熔融除去加工不可能な低パワーの CO₂ レーザでも加工が進行することを確認し、報告してきた⁷⁾⁸⁾。また、Si 単結晶においても、同様の加工が可能であることを確認している⁸⁾。そこで、本報告では、CO₂ レーザ照射によって形成された高温場において、どのような熱化学反応が Si 表面上で起こっているかを知るため、反応層が形成された Si 表面の、フーリエ変換赤外反射吸収スペクトル分析 (FT-IR-RAS)、エレクトロンマイクロプローブ分析 (EPMA)、X 線励起光電子分光分析 (XPS) を行い、表面元素の結合状態および構成元素を明らかにした。さらに表面光電圧を測定することによって、表面電子のエネルギー状態についてモデル的考察を行った。また、Si 表面層内電子状態のモデル的計算を行い、表面光電圧の測定より得た結果と比較検討することにより、CO₂ レーザと KOH 水溶液を用いた Si のエッチングにおける加工機構についての考察を行った。

* 原稿受付 昭和 61 年 10 月 17 日、昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和 61 年 10 月 11 日）にて発表

** 正 会 員 京都工芸繊維大学工学部（京都市左京区松ヶ崎御所海道町）

*** 正 会 員 大阪大学工学部（吹田市山田丘 2-1）

† 帝国女子大学（守口市藤田町 6 丁目 173）

†† 三洋電機（株）（守口市京阪本通 2-18）

Fig. 1 Etching apparatus

Fig. 2 Etched hole profile on Si

2. 加工実験

図1に実験方法の概略を示す。使用したCO₂レーザは、最大出力30Wの内部ミラー型である。レーザビームは、焦点距離60mmのZnSeレンズで絞られ、試料表面上でのスポット径は約360μmである。試料として用いたSiウエハは、一辺4mmの正方形で、表面はポリシングされている。レーザパワー密度17kW/cm²以下では、熔融除去加工は行えなかった。CO₂レーザは、水に吸収されるため、試料をKOH水溶液中に置くことはできない。そこで、試料表面に10mol/lのKOH水溶液を塗布した後、レーザを照射すると、17kW/cm²以下のパワー密度でも加工が進行した。図2に、表面粗さ計による加工穴断面形状の一例を示す。KOH水溶液を試料表面に供給する方法としては、塗布する方法以外に、試料表面に適量を滴下する方法や、試料を水溶液中に浸した後、引き上げる方法などを行ったが、試料表面上にKOH水溶液が存在しておれば、熔融除去加工が不可能な低パワーのレーザで加工が進行するという結果は同様であった。加工速度などの加工特性は、KOH水溶液塗布量のほかに、レーザパワー密度、KOH水溶液濃度などによって変化すると考えられるが、本研究の目的は、試料表面で生じている熱化学反応、および試料表面の物性的変化を調べることであり、本報告では、加工特性については取り扱わない。

同様の実験方法で、Si₃N₄焼結体を試料として用いた場合、10kW/cm²以下のレーザパワー密度では、KOH水溶液を塗布しない場合は加工されなかったが、水溶液を塗布することにより、Siと同様の加工孔が得られた。なお、用いたSi₃N₄は、焼結助剤として、Al₂O₃、MgO、Y₂O₃が含まれている。SEM観察による

Fig. 3 FT-IR-RAS spectra of Si surfaces obtained by subtracting the absorption of intrinsic Si surfaces

と、加工面の性状は、KOH水溶液を用いずに高いパワー密度で形成された熔融加工面とはまったく異なっており、筆者らは、加工現象が熱化学反応によって促進されているものと考えてきた^{7,8)}。そこで、試料表面にどのような化学反応層が形成されているのかを明らかにするため、以下に述べるような表面分析を行った。

3. 表面分析

Si単結晶表面に、KOH水溶液を塗布した後、CO₂レーザを140W/cm²のパワー密度で試料全面に照射すると、表面が白色に変化し、反応層が形成されるのが認められた。試料として用いたSi単結晶は、抵抗率1.5Ωcmのn型である。表面は(100)面で、ポリシングされており、厚さは500μmである。KOH水溶液の濃度は10mol/lで、反応層形成後、試料は水中で超音波洗浄した。

3.1 フーリエ変換赤外反射吸収スペクトル分析 (FT-IR-RAS)⁹⁾

反応層形成後のSi表面の赤外反射スペクトルを測定し、ポリシング面から得られたスペクトルとの差をとることにより、反応層に生じている化学結合を評価した。図3に結果を示す。Si表面にKOH水溶液を塗布しただけでは、表面に新たな化学結合は生じない。しかし、同時にCO₂レーザを照射することにより、表面には新たな結合状態が生じる。これは、Si-O結合であると考えられる¹⁰⁾。また、CO₂レーザを照射だけでも表面の酸化反応が促進されている¹⁰⁾。しかし、スペクトルを比較すればわかるように、レーザ照射のみで得られるSi-O結合と、KOH水溶液を塗布して得られるSi-O結合とでは、明らかにその結合状態は異

Fig. 4 FT-IR-RAS spectra of Si surfaces obtained by not subtracting the absorption of intrinsic Si surfaces

なっている。なお、図3で見られる 2400 cm^{-1} 付近の吸収は、空気中の CO₂ によるもので、試料表面の状態とは関係ない。また、試料表面の EPMA および XPS 元素分析によると、カリウムその他の酸素以外の不純物元素は検出されなかった。図4は、Si 酸化表面の赤外反射スペクトルを、差スペクトルを取らずに示したものである。レーザ照射のみによって形成された Si-O 結合の吸収ピークは1か所 (1078 cm^{-1}) であるが、KOH 水溶液の作用によって得られる Si-O 結合の吸収ピークは3か所 (図中矢印) あることがわかる。以上の分析は、Si₃N₄ 焼結体についても行い、同様に Si-O 結合が表面で生じていることが確かめられた。

3.2 表面光電圧の測定

前節の表面分析によって、KOH 水溶液と CO₂ レーザによって、Si 表面が酸化されることがわかった。さらに、レーザ照射のみによって得られる酸化層と、KOH とレーザ照射によって得られる酸化層とでは、Si-O 結合の結合状態が異なることがわかった。そこで、両酸化面の違いを、フェルミ準位の差として定量化し、評価することを目的として、表面光電圧⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の測定を行った。Si 表面のエネルギーバンド構造は、一般にはバルク内部と異なっており、従ってそのフェルミ準位も異なる。しかし、電子が表面層とバルク内部の間を移動できるため、フェルミ準位が一致するように、すなわちエネルギー的平衡状態が達成されるように電子が移動し、その結果として表面層とバルク内部で電子軌道のポテンシャルが異なり、図5のように表面でバンドが曲がっている⁽¹³⁾。以下、この曲がり量を V_s とおき、表面ポテンシャルと呼ぶ。このエネルギー

Fig. 5 Energy band and surface potential, V_s , of n-type Si

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus used to measure the surface photo voltages of Si

バンドの曲がり量は、表面にバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射することによって電子を伝導帯へ励起し、バルク内部へ移動させることによって緩和することができる。照射光量が十分大きいと、バンドをフラットな状態にすることができる。このとき、バルク内部へ流れる電荷量を測定することによって、 V_s を決定することができる。図6に表面光電圧の測定系を示す。励起光には、波長 4880 Å の Ar イオンレーザを用いた。試料表面にガラス板 (厚さ 0.14 mm) を挟んで、Cu メッシュ (#100) を対向させると、Cu メッシュには V_s に依存した電荷が誘起される。Ar イオンレーザを Cu メッシュを通して試料表面に照射し、エネルギーバンドをフラットな状態にしてやると、Cu メッシュに誘起されていた電荷が放電される。このとき生じる電圧をブリアンプで増幅し測定する。レーザのチョッピング周波数は 42.7 Hz 、試料部分の面積は $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ である。測定系の等価回路解析により、ブリアンプの出力 V_p は、 V_s によって次のように表される⁽¹⁴⁾。

$$V_p(t) = \frac{C_1 V_s}{C_1 + C_2} \exp\left\{-\frac{t}{(C_1 + C_2)R}\right\} \quad (1)$$

ここに、 C_1 は試料表面と Cu メッシュとで形成された

Fig. 7 Surface potential versus CO₂ laser irradiation time

コンデンサの容量, C_2 は同軸ケーブルの容量, R はブリアンプの入力インピーダンスであり, それぞれ次の値を持つ.

$$C_1 = 0.623 \text{ pF}$$

$$C_2 = 130 \text{ pF}$$

$$R = 78 \text{ M}\Omega$$

また, t は, コンデンサの放電開始からの時間である.

以上の方法により, レーザ照射のみにより形成された酸化面と, KOH 作用下でのレーザ照射により形成された酸化面について, 大気中, 室温において表面ポテンシャル V_s を測定した. ただし, Ar イオンレーザの出力は 0.18 W である. それ以上レーザパワーを増加させても, 表面光電圧の出力の増加はみられなかった. 従って上記のレーザパワーにより, フラットなエネルギーバンドが得られているものと判断した. 図 7 に CO₂ レーザの照射時間と, 表面ポテンシャル V_s との関係を示す. CO₂ レーザの照射により, 酸化層が形成され, V_s が変化することがわかる. また, レーザ照射のみにより形成された酸化面と, KOH 作用下でのレーザ照射により形成された酸化面では, V_s が異なっており, 後者の方が高エネルギー側へエネルギーバンドが曲がっていることがわかる. これは, 表面層とバルク内部間で電子の移動がない場合, すなわち熱的非平衡状態における表面酸化層のフェルミ準位が, 両酸化面で異なっており, KOH 作用下で形成された酸化面のフェルミ準位の方が, レーザ照射のみにより形成された酸化面のフェルミ準位よりも低い位置にあることを示している. このような表面層とバルク内部間での熱的非平衡状態における, 表面層のフェルミ準位の低下は, 表面層でのエネルギーバンド禁止帯内に

アクセプタ型電子準位¹⁵⁾の存在を仮定することにより説明できることを以下に示す.

フェルミ準位は, 充満帯の有効状態密度 N_v , 伝導帯の有効状態密度 N_c , 充満帯の有効エネルギー準位を 0 としたときの伝導帯の有効エネルギー準位 E_c , ドナー準位 E_d , ドナー濃度 N_d , および絶対温度 T を与えることによって計算でき, 抵抗率 1.5 Ωcm の場合, それぞれ次のように表される¹⁵⁾.

$$N_c = (2\pi m_n^* kT/h^2)^{3/2}$$

$$N_v = (2\pi m_p^* kT/h^2)^{3/2}$$

$$E_c = 1.1 \text{ eV}$$

$$E_d = 1.05 \text{ eV}$$

$$N_d = 2.21 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$$

ただし, k はボルツマン定数, h はプランク定数, m_n^* , m_p^* はそれぞれ, 電子, 正孔の有効質量であり, m_0 を電子の質量として, それぞれ, $m_n^* = 1.08 m_0$, $m_p^* = 0.56 m_0$ とした.

図 7 の結果から, レーザ照射のみによって形成された酸化面の V_s は 0 であるので, モデル的には表面のエネルギー状態は, バルク内部と同じと考えられる. ここで, KOH とレーザ照射によって形成された酸化表面のエネルギー状態として, アクセプタ型電子準位の存在を禁止帯内に仮定する. そのエネルギー準位 E_{as} と濃度 N_{as} を与えることによって, 表面層のフェルミ準位が, 任意の温度 T に対して計算できる. これを, E_{Fs} とおく. バルク内部のフェルミ準位は, 既知であるのでこれを E_{Fb} とおくと, 表面ポテンシャル V_s は次式で与えられる.

$$V_s = E_{Fb} - E_{Fs}$$

図 8 は, V_s の測定値と上記モデルによる計算値の温度特性を示したものである. $E_{as} = 0.83 \text{ eV}$, $N_{as} = 1.0 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ とおくことによって V_s の測定値を表現できることがわかる.

以上の測定およびモデル解析は, 抵抗率の異なる試料, および p 型の試料に対しても行い, 定性的に同様の結果を得た. すなわち, KOH 作用下で形成された酸化面には, レーザ照射のみにより形成された酸化面に比べて, 過剰にアクセプタ型電子準位が禁止帯内に存在していると, モデル的に考えることができる. 本章では, このようなアクセプタ型電子準位が, 単なるモデル的なものではなく, ある種の表面酸化層構造を仮定することにより, 実際に生じることを計算によって示し, 両酸化層の差異を物理的に明確化する.

4. Si 酸化表面層内電子状態密度の計算

前章で議論したような酸化反応層においては, 酸素

Fig. 8 Measured surface potential, V_s , and the calculated values as a function of surface temperature

原子は Si 原子との置換，あるいは Si 原子間への侵入という形で存在し，その構造は不規則であると考えられ，電子状態の精密な計算は不可能である．しかし Si 原子と酸素原子との違いが明確になるよう，計算に用いるパラメータの値を設定し，かつ物理的に意味を失わない範囲で簡潔化された構造モデルを仮定すれば，電子の局所状態密度を計算することにより，酸化表面層の物性について定性的な議論をすることができると考えられる．ここでは，経験的 tight-binding 理論¹⁶⁾¹⁷⁾と recursion 法¹⁸⁾¹⁹⁾を適用し，電子の局所状態密度を求めた．計算に用いたハミルトニアン行列要素のうち，Si 原子に対するものは参考文献 16) に従った．酸素原子については，クーロン積分²⁰⁾の値を Si 原子に比べて 8 eV 低い値に設定した．この値は，理論的に根拠のあるものではないが，Si 表面第一層を酸化させたモデルに対して計算を適用し，電子の局所状態密度を求めた結果，禁止帯幅約 7 eV の絶縁体エネルギーバンド構造が得られたことから定性的には正しい結果を与える経験的数値として用いた．また，酸素原子の方が Si 原子よりも電気陰性度が大きいことから考えても妥当な数値である²⁰⁾．図 9 に，種々の表面層構造における電子の局所状態密度の計算結果を示す．ただし A はバルク内部の状態密度である．計算に用いた構造モデルは，1000 個の原子から成る立方体であり，図中に示した部分領域に対する状態密度を求めた．図 9 B は理想表面の電子状態密度であり，A と比較すればわかるように，禁止帯内 (0~1.1 eV) に表面準位が現れている．これはアクセプタ型の電子準位であり，表面のエ

Fig. 9 Calculated local density of electron states for model structures of Si(100) surfaces

ネルギーバンドが高エネルギー側に曲がることを示唆している．C は表面第一層に酸素原子を結合させたものであり，表面準位が消失しており，理想表面で高エネルギー側へ曲がっていた表面のエネルギーバンドが低エネルギー側へ戻ること示唆している．これは，CO₂ レーザの照射により表面酸化層を形成してやると，表面のエネルギーバンドの曲がりが高エネルギー側へシフトするという前章の実験結果を定性的に説明している．図 9 D は，内部に原子空孔を持つ酸化層モデル，E は酸素原子が内部に侵入した酸化層モデルであり，内部にダングリングボンド，すなわち余った結合手が存在する．これは KOH 作用下で形成された酸化表面に対応するモデルである．B と同様に禁止帯内にアクセプタ型電子準位を生じており，C に比べて表面でエネルギーバンドが高エネルギー側に曲がることを示唆している．以上のように，禁止帯内のアクセ

タ型電子準位は、表面層内の余った結合手によって生成されることがわかる。このような余った結合手は、結晶の乱れによって生ずると考えられる。KOHによって形成された酸化表面層に、このような結合状態の乱れが、CO₂ レーザの照射のみによって形成された酸化表面層に比べて、より多く存在していると考えれば、以上の計算結果は KOH による酸化表面層のエネルギーバンドが、CO₂ レーザの照射のみによる酸化表面層のエネルギーバンドに比べて高エネルギー側ヘシフトしているという前章の実験結果を定性的に説明することができる。

以上の表面分析結果、および酸化表面層内における電子のエネルギー状態のモデル的解析結果から、KOH と CO₂ レーザによる Si の加工機構として以下のようなことが予想される。すなわち、Si 表面に KOH 水溶液を塗布した後、CO₂ レーザを照射すると表面に酸化層が形成される。この酸化層は、CO₂ レーザ照射のみによって形成された酸化層に比べて、原子間の結合状態が乱れており欠陥濃度が高い。従って酸化層内の原子間結合エネルギーは低下していると考えられ、低パワーの CO₂ レーザ照射によって形成される、Si の熔融温度以下の温度場でも原子が分離、蒸発し、加工が進行する。

5. 結 言

Si または Si₃N₄ 焼結体表面に、KOH 水溶液を塗布することにより、熔融除去加工不可能な低パワーの CO₂ レーザでも加工を進行させることができる。これは、表面で生じる熱化学反応に基づく加工現象であると考えられ、筆者らは表面に形成された反応層の元素分析、結合状態の分析、表面光電圧の測定による表面電子のエネルギー状態解析、および反応層のモデル構造に対する電子状態密度の計算を行い、以下の結論を得た。

- (1) 表面は、KOH と CO₂ レーザ照射により酸化される。
- (2) 表面の Si-O 結合状態は、CO₂ レーザ照射のみによって形成された酸化層におけるものと異なり、禁止帯内に過剰なアクセプタ型電子準位が存在する。
- (3) 禁止帯内のアクセプタ型電子準位は、表面酸化層内のダングリングボンドの存在、すなわち結合状態の乱れによって生ずる。

さらに、以上の結果から、KOH 作用下で形成された酸化層内の原子間結合エネルギーは減少しており、通常の状態に比べて、より低温で原子が分離・蒸発す

ると考えられるため、低パワーの CO₂ レーザでも加工が進行するものと予想される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、元素分析に関して御協力いただいた、大阪ガス株式会社総合研究分析センター、岡田信彦所長、森武次次長、同社新分野開発部藤井輝彦課長、京都市工業試験場金属材料研究室、菊内康正氏、Ar イオンレーザの使用に関して御協力いただいた、京都工芸繊維大学工業短期学部機械工学科、自念榮一教授、堀尾啓介講師、フーリエ変換赤外反射吸収分光分析に関して御協力いただいた、金沢大学工学部電子工学科、清水立生教授、森本章治助手、および試料の製作にあたり御協力いただいた、京都工芸繊維大学工芸学部生産機械工学科、福田正成教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. J. Chuang: Laser-induced Chemical Etching of Solids: Promises and Challenges, Materials Research Soc. Symposia Proc. 29, *Laser-controlled Chemical Processing of Surfaces*, ed. by A. W. Johnson, D. J. Ehrlich and H. R. Schlossberg, North-Holland, (1984) 185.
- 2) D. J. Ehrlich and J. Y. Tsao: A Review of Laser-microchemical Processing, J. Vac. Sci. Technol., **B1**, 4, (1983) 969.
- 3) T. J. Chuang: Laser-enhanced Gas-surface Chemistry: Basic Processes and Applications, J. Vac. Sci. Technol., **21**, 3, (1982) 798.
- 4) 森田 昇, 石田修一, 長野幸隆: セラミックスのレーザ加工, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1985) 161.
- 5) 松井伸介, 小藪国夫, 渡辺純二: レーザアシストケミカルエッチング(第5報)——種々のセラミックスに対する加工特性, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1985) 125.
- 6) R. J. von Gutfeld and R. T. Hodgson: Laser Enhanced Etching in KOH, Appl. Phys. Lett., **40**, 4, (1982) 352.
- 7) 井上友一, 土屋八郎, 後藤英和, 宮崎 眞: セラミックスの電解放電加工における加工機構について, 精機学会昭和59年度関西地方定期学術講演会講演論文集 (1984) 77.
- 8) 土屋八郎, 森 勇蔵, 広瀬喜久治, 後藤英和, 宮崎 眞, 西 雅文: 高温場での化学反応に基づく固体表面原子の除去機構に関する研究, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1985) 745.
- 9) A. Ishitani, H. Ishida, F. Soeda and Y. Nagasawa: Fourier Transform Infrared Reflection Absorption Spectrometry and Electron Spectroscopy for Chemical Analysis for Surface Analysis, Anal. Chem., **54**, 4, (1982) 682.
- 10) T. Tokuyama, T. Warabisako, E. Murakami and K. Miyake: Laser-induced Oxidation of Silicon Surfaces, *Laser Processing and Diagnostics*, ed. by D. Bäuerle, Springer, Berlin, (1984) 288.
- 11) J. Clabes and M. Henzler: Determination of Surface States on Si (100) by Surface Photovoltage Spectroscopy, Phys. Rev., **B25**, (1980) 625.

- 12) M. Büchel and H. Lüth: Surface Photovoltage Spectroscopy of Electronic Surface States on Cleaved Germanium (111) Surfaces, *Sur. Sci.*, **50**, (1975) 451.
- 13) 中村勝吾：表面の物理，共立出版（1982）189.
- 14) 森 勇蔵，山内和人，杉山和久，関口 剛，増田健二，山下耕作：EEM に関する研究——粉末粒子の工作物表面への付着に起因する工作物表面電位の変化と加工特性，昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集（1985）457.
- 15) 原留美吉：半導体物性工学の基礎，工業調査会（1980）107.
- 16) P. Vogl, H. P. Hjalmarson and J. D. Dow: A Semi-empirical Tight-binding Theory of the Electronic Structure of Semiconductors, *J. Phys. Chem. Solids*, **44**, 5, (1983) 365.
- 17) D. J. Chadi and M. L. Cohen: Tight-binding Calculation of the Valence Bands of Diamond and Zincblende Crystals, *Phys. Stat. Sol.*, **B 68**, (1975) 405.
- 18) R. Haydock: The Recursive Solution of the Schrödinger Equation, *Sol. Stat. Phys.*, **35**, (1980) 215.
- 19) C. M. M. Nex: Estimation of Integrals with Respect to a Density of States, *J. Phys.*, **A 11**, 4, (1978) 653.
- 20) 米澤貞次郎，永田親義，加藤博史，今村 詮，諸熊奎治：量子化学入門（上），化学同人（1984）64.

情報

（p.1732 より続く）

地球分野では地震災害，火山災害，異常気象の予知，予報に関連する課題が重視され，「マグニチュード7以上の地震の発生の有無を数日程度以前に予測できる技術の開発」は重要度が91%で，実現時期は2007年となっている。

物質・材料・加工では「光・電磁気特性材料」，「設計・合成・加工技術」の関連課題が重要視されており，中でも光・電磁気特性材料は，重要度「大」の比率が7割を超えた5課題中，4課題を占めた，実現時期は今世紀中と回答した課題が多い。

超電導材料は最近の技術進展を考慮して補足調査を実施したが，「産業用電気機器に使用しうのような液体窒素（絶対温度77 K）以上の臨界温度をもつ超電導材料の実用化」が重要度「大」96%，実現時期1994年である。応用分野である「電力貯蔵用巨大超電導コイルの開発」に関しても，補足調査では時期が2003年から1999年に繰り上がった。

エネルギー，通信も重要度が高いとされた分野で，「高レベル放射性廃棄物の固化体の貯蔵管理・処分技術の実用化」が2002年，「核燃料サイクルを含めたFBR（高速増殖炉）システムの実用化」が2013年に予想されている。

さらに，通信分野では「全世界のほとんどの国を覆う国際ISDN（サービス総合デジタル網）が形成され，国内ISDNから自動接続が可能となる」が2003年，重要度がそれほど高く評価されないながら「国際電話オペレータ業務相当の自動翻訳電話サービスが始まる」は2001年とみている。

そのほか，情報・電子・ソフト関連では「10⁶ ゲート以上の論理LSIを設計できるCAD技術が実用化される」が比較的近く1994年，「ソフトウェア検証技術が進み，誤りのない大規模ソフトウェアの短期開発が可能となる」が2002年に実現するとの予測となった。

（服部 敏夫）

重要技術の実現時期予測

1994年	産業用電気機械に使用しうのような，液体窒素（77 K）以上の臨界温度をもつ超電導材料が実用化される（ただし3回調査）
"	10 ⁶ ゲート以上の論理LSIが設計できるCAD技術が実用化される
1996	プロトコル自動変換技術により様々な通信網の相互接続が容易に行われるようになる
1998	細胞のがん化の機構が解明される
"	抗ウイルス剤によるウイルス性疾患の治療が普及する
"	特定の機能を発現させるため，たんぱく質の1次構造をデザインする技術が開発される
2000	車輪やレールへの新材料の利用や車両構造の技術改善により，列車走行によって線路周辺に発生する騒音や振動が大幅に減少する
2002	がんの転移を防ぐ有効な手段が開発される
"	高レベル放射性廃棄物の固化体の貯蔵管理・処分技術が実用化される
"	ソフトウェア検証技術が進み，誤りのない大規模ソフトウェアの短期開発が可能となる。
"	たんぱく質の高次構造から機能を予測する技術が確立される
2003	全世界のほとんどの国を覆う国際ISDNが形成され，国内ISDNから自動接続が可能となる
"	宇宙往復費用を格段と低減化する高機能（高比強度，高比弾性率，耐熱），高信頼性新材料が開発される
2005	がん細胞を正しい分化の方向に誘導して正常化させることが可能となる。
2007	被害の発生が予想されるマグニチュード7以上の地震の発生の有無を数日程度以前に予測できる技術が開発される
2008	脳の発生・成長過程が分子レベルで解明される
2009	ほとんどすべての種類のがんについてがん化の機構が解明される
2011	老人性痴呆症を予防する有効な方法が開発される
2013	核燃料サイクルを含めたFBR（高速増殖炉）システムが実用化される