

「2020年の材料科学」

～エレクトロニクス志向の有機材料とナノテクノロジー～

電気通信大学 量子・物質工学科 石田尚行
e-mail: ishi@pc.ucc.ac.jp
http://tf.pc.ucc.ac.jp/www.page/Ishida.html

大学で身につけた学問は
どのように役立つか？
物質科学の目指すものは？
ゴールは？

を意識して

motivation
を高く持とう

目次

- 1) 電気通信大学における化学
- 2) 材料科学：エレクトロニクス志向の化学
役に立っている材料科学
- 3) ナノテクノロジーって何？
 - i) 2020年の集積度
 - ii) 分子素子

「就職に勝つ！」週刊ダイヤモンド (2000.4.15号)

「大学には独自のカラーや得意分野がある。そうした特色がOBが活躍している割合が高い業界や企業となって表れる」

----- 役員・管理職数の統計

「卸売り・小売り」「建設」「IT産業」「金融」「電気機器」「鉄鋼」の6業種のうち、2業種の“大学別業界突出度ランキング”：

【IT産業】			【電気機器】		
順位	突出度	突出度	順位	突出度	突出度
1	電気通信 5.48	横浜国立 1.62	1	電気通信 5.79	新潟 1.73
2	東京工業 2.40	大阪 1.60	2	東京電機 3.66	山形 1.72
3	筑波 2.18	上智 1.59	3	山梨 2.54	東京都立 1.65
4	山梨 2.18	九州工業 1.56	4	東京工業 2.40	千葉 1.64
5	東京電機 2.10	東北 1.53	5	筑波 2.22	東北 1.62
6	山形 1.93	東京都立 1.52	6	東京理科 2.14	大阪 1.60
7	東京 1.91	京都 1.47	7	静岡 2.01	大阪 1.42
8	千葉 1.90	東京理科 1.43	8	九州工業 1.96	上智 1.39
9	成蹊 1.77	一橋 1.41	9	信州 1.85	成蹊 1.36
10	東京外語 1.68	学習院 1.40	10	武蔵工業 1.78	東海 1.29

『実は、「IT産業」の集計に当たっては幅広い業種のなかから対象とする企業を選んだ。それでも電気通信大学が突出して一位になった。』

PRESIDENT 誌 (2007.10.15号 p.73)

Look!

順位	大学名	年収調査年数	入学前年収	市販情報	平均年収	偏差値	就職人数
1	東京工業大学*	63	61	2.0	810	1005	1630
2	慶応義塾大学*	59	56	5.0	778	1020	2447
3	電気通信大学*	59	49	10.3	773	341	796
4	公立はこだて未来大学*	58	46	12.2	763	19	200
5	日本工業大学*	57	41	16.8	759	37	864
6	京都工芸繊維大学*	57	54	2.9	755	178	613
7	名古屋工業大学*	56	50	7.0	752	417	981
8	九州工業大学*	56	50	6.5	748	372	1058
9	芝浦工業大学*	55	52	3.6	739	371	1317
10	高知工科大学*	55	39	16.4	738	35	451
11	武蔵工業大学*	55	50	5.3	737	325	1173
12	金澤大学*	55	46	9.2	735	35	205
13	工学院大学*	54	45	9.6	733	166	955
14	東京電機大学*	54	46	8.7	731	334	1705
15	長岡技術科学大学*	54	48	6.3	728	89	428
16	広島工業大学*	53	44	8.8	717	79	923
17	金沢工業大学*	52	46	6.0	712	118	1466
18	大分県立大学*	52	48	4.6	712	210	1558
19	岡山理科大学*	51	43	7.6	701	62	1035
20	大田工業大学*	50	42	8.0	692	25	706
21	北海道工業大学*	50	40	9.6	689	43	779
22	千葉工業大学*	49	43	6.1	686	180	1501
23	駒込東京理科大学*	49	39	10.0	682	19	249
24	神奈川工科大学*	48	44	4.2	675	65	985
25	東北工業大学*	48	41	7.4	674	44	701
26	東京農業大学*	48	53	-4.7	673	166	2216
27	福岡工業大学*	47	42	4.9	666	47	812
28	八戸工業大学*	46	39	7.9	660	20	382
29	東京工科大学*	46	45	0.7	653	93	937
30	大原電気通信大学*	45	44	1.1	652	60	1023

年収偏差値
第3位、
おまけに
お買い得。

全国・理工系大学 狙うならここだ
全国の理工系大学の平均年収・年収偏差値の順位を比較し、
その就職力は抜群、年収偏差値も高い、実入りアツいの大学をピックアップした。

お買い得大学？！

読売ウィークリー (2008.2.17号)

電気通信大学は、偏差値の割には就職がいい

業界別の就職力調査：喜んでいいの、悲しんでいいの...

電機業界第1位

情報・通信業界第5位

入るのはやさしいが、
(いい教育を経て、)
いい卒業生となるから、
社会からは信頼が厚い。



「電通大」 --- 名前だけではわからない総合理工大学
7学科あります

地名のついていない唯一の国立大学
--- 唯一無二の誇り、全国規模

IT、ナノテク、バイオを学ぶなら、ここだ！

量子・物質工学科

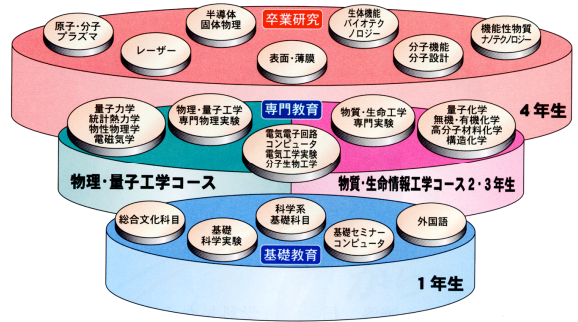


量子工学講座
物理工学講座
物質工学講座
生命情報工学講座

分子素子工学、
機能性物質工学 etc.



量子・物質工学科の教育プログラム



本学科は一般的な化学/物理の学科です
大学の枠組みの中で、
コンピューター、回路学、電磁気学なども重視

目次

- 1) 電気通信大学における化学
- 2) 材料科学：エレクトロニクス志向の化学役に立っている材料科学
- 3) ナノテクノロジーって何？
 - i) 2020年の集積度
 - ii) 分子素子

たとえば、ノートパソコン



1. 液晶ディスプレイ (有機EL、フィルタ)
 2. バッテリー (ポリアニリン、ラジカル)
 3. CD-R、DVD-R、Blu-Ray (光反応性色素)
 4. スピーカー (平面振動板)
 5. 外殻、骨組 (エンジニアリングプラスチック)
 6. 回路基板、フレキシブル基板
 7. LSI・IC ケース、放熱機構
 8. リソグラフィ技術 (フォトリソ)
- etc.



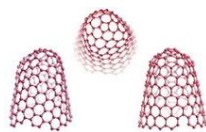
飯島 澄男

NEC特別首席研究員
1963 電気通信大学通信学科卒業

NECなど、カーボンナノチューブ電極採用の携帯機器向け燃料電池を開発

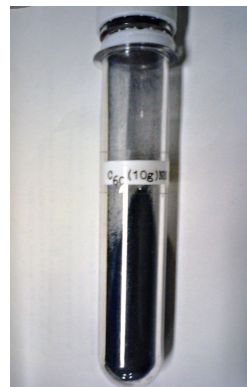
2001年8月30日

日本電気(株)らは、カーボンナノチューブの一種である“カーボンナノホーン”を電極に採用した携帯機器向けの小型燃料電池を開発した。エネルギー密度がリチウム2次電池の10倍など、高効率な次世代エネルギーとして注目されている。将来的にはノートパソコンの数日間の連続使用などが可能になるという。



カーボンナノホーン

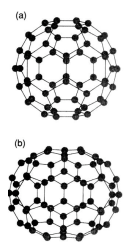
フラーレン C₆₀



固体は煤そのもの
溶液は鮮やかな紫



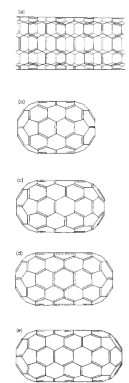
サッカーボール分子、C₆₀
ラグビーボール分子、C₇₀



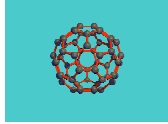
「線は帳面に引け」 by Euler
エッジの数 = 頂点の数 + 面の数 - 2

どんなフラレンにも
正五角形が12個ある

フラレン
引き延ばしたら
ナノチューブ

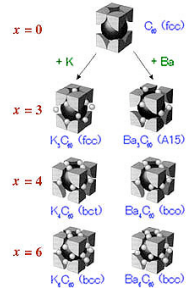


フラレンC₆₀のアルカリ金属塩
(M⁺)₃(C₆₀³⁻)
超伝導体になる



化合物	結晶構造	格子定数 (nm)	T _c (K)
Na ₃ RbC ₆₀	sc (< 313K)	1.4028	3.5
Na ₃ CsC ₆₀	sc (< 299K)	1.4046	12
KRb ₃ C ₆₀	fcc	1.4337	27
K ₃ RbC ₆₀	fcc	1.4267	23
K ₃ CsC ₆₀	fcc	1.4292	24
K ₃ C ₆₀	fcc	1.4240	19.3
RbCs ₂ C ₆₀	fcc	1.4555	33 (最高T_c)
Rb ₃ CsC ₆₀	fcc	1.4431	31.3
Rb ₃ C ₆₀	fcc	1.4384	29
Ca ₃ C ₆₀	sc	1.4010	8.4
Br ₃ C ₆₀	dcc	1.0975	4
Ba ₃ C ₆₀	dcc	1.1171	7

有機超伝導転移温度の記録保持者!



ポリアセチレン



白川英樹先生の年賀状



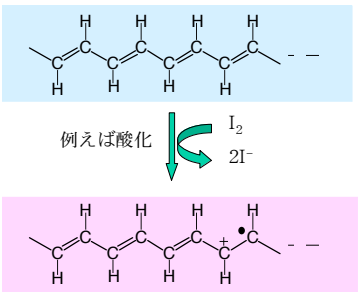
新しい世紀を迎えて、皆様には益々ご健勝のこととお慶び申し上げます。昨年十月十日のノーベル化学賞受賞の発表に際し、早速ご温まる祝電やお便りを頂き誠に有り難うございました。

授賞式に参加のため昨年十二月四日からストックホルムに赴いておりましたが、一連の行事を終えて同月十六日に帰国いたしました。授賞式では化学賞審査委員長のノルディエノ教授からお祝いの言葉の一部を日本語で頂き、また、スウェーデン国王カール十六世から賞状とメダルを頂くなど、終生忘れられない思い出となりました。授賞式に先立ってスウェーデン国内ではあらかじめ録音された受賞者紹介するテレビ番組が度々放映されたことあつて、薬師や症の録音テープを見てお祝いの言葉を頂きました。お祝いのお札を申し上げますが、帰国後も多大なご厚意で御書面にてお礼を申し上げます。

平成十三年元旦

白川 英樹

ポリアセチレンはドーピングしなければ絶縁体 (白川英樹)



絶縁体

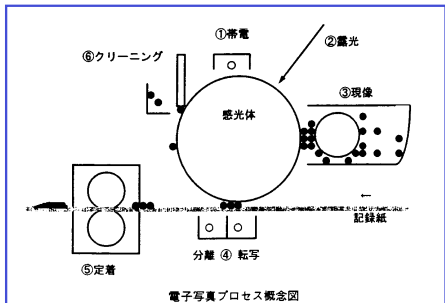
例えば酸化 I_2 / $2I^-$

電導体

「満員の映画館では席替えができないが、空席があれば席を移ることができる」

銅、銀、金よりも電導性のよい有機材料は、ざらにある。

実用例の一つ：
デジタルコピー機・レーザープリンタの原理

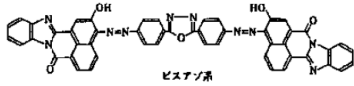


電子写真プロセス概念図

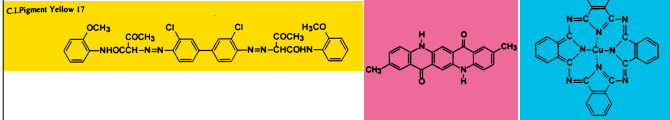
黒いところ → 露光されない → 静電気残る
白いところ → 露光される → 静電気失う

有機材料が大活躍:

- 1) 感光体: OPC (Organic Photo-Conductor)
 有機化合物は静電気を帯びる性質をもつが、OPCは光が当たると導通し、静電気を失う。キャリア生成材、キャリア輸送材、電荷制御材、バインダはすべて有機化合物。



- 2) カラートナー-YMCK



電導体、磁石、
 これまで無機物に特有と思われてきた性質

なぜだろう？ どうしてだろう？
 この性質の起源、発現の原理を解き明かす
 (ここを「勉強」する必要がある)

有機物にも、
 これらの性能を付与できるようになる

役に立つ画期的新材料の開発へ進む

目次

- 1) 電気通信大学における化学
- 2) 材料科学: エレクトロニクス志向の化学役に立っている材料科学
- 3) ナノテクノロジーって何?
 - i) 2020年の集積度
 - ii) 分子素子

ウェアラブルコンピュータ



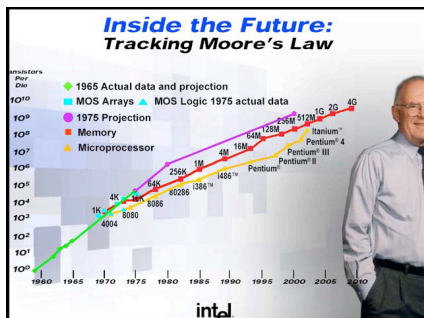
デートで行く映画館だって腕に付けたウェアラブルコンピュータで検索できてしまうのだ

「ウェアラブル・コンピュータ・ファッションショー」

<http://www.pc.mycom.co.jp/pcfan/news/1998/11/25/05.html>

CPU の集積度

1年半で約2倍の割合で向上してきた (ムーアの法則)



(Intel 社)

2020年の集積度は、2000年のその10000倍
 すなわち微細加工技術で、100倍が要求される?!

マイコミジャーナル

2007年11月13日

Intel、45nm世代のCore 2 Extremeなど
 新型プロセッサを国内発表



2008年01月09日

Intel、初のモバイル向け45nmプロセッサ
 Core 2 Extreme X9000など発表

記録メディアの「密度」

CD	650 MB / 12 cm	→ 10 μm ² /bit
DVD	4.7 GB / 12 cm	→ 1 μm ² /bit
BD	25 GB / 12 cm	→ 0.1 μm ² /bit
HD	30 GB / inch	→ 0.002 μm ² /bit

サブマイクロメートルの加工技術
 光学ディスクで、0.2 μm程度
 HDで、0.05 μm程度

加工精度は、LSIと同程度

RAM (フラッシュメモリー)の集積度

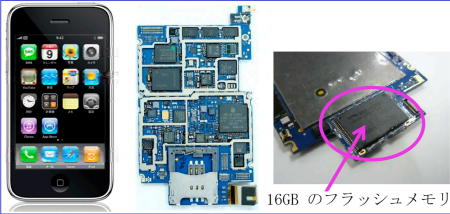
1年で約2倍の割合で向上してきた
(ホアン・チャンギユの法則 (Samsung))



Sep 29th 2008

16 GB microSDHCカードが SanDiskから正式発表。価格は \$129.99。11月出荷。

microSD

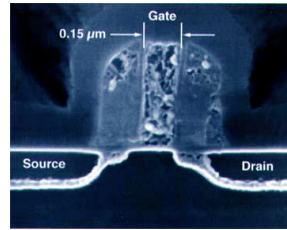


16GB のフラッシュメモリ

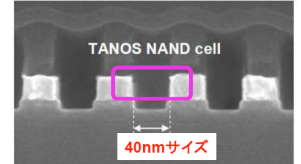
iPhone の分解図
容量 16 GB 内蔵

竹内先生@東大

0.15 μm ゲート電極を持った電界効果トランジスタの電子顕微鏡写真 (1G DRAM相当)



0.04 μm サイズの構造を持ったフラッシュメモリーの電子顕微鏡写真 (16 GB 相当)



構造上高密度化が容易なのだが、
50 nm → 16 GB
30 nm → 32 GB
20 nm → 限界?



リソグラフィー技術とは：

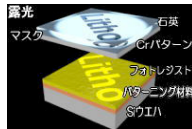
回路パターン原版に光をあて、投影レンズで縮小し、ICの基板となるシリコンなどの薄板(ウェハ)に回路パターンを露光転写する。

ステッパー



ニコン製

キヤノン製



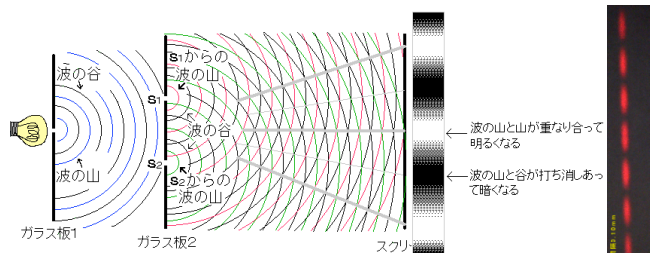
液晶ディスプレイや、ハードディスク磁気ヘッドの製造にも使用される。

●投影レンズの表面精度の誤差は、直径 20 cm で 10 nm 以下。
東京ドームのグラウンドにたとえると、わずか 0.006 mm の凹凸。

光は波としての性質をもつ

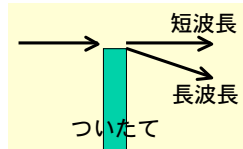
(例：可視光 波長：380 nm ~ 780 nm)

光は回り込んだり、干渉したりする

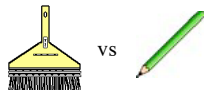


波の重ね合わせの原理の例) ノイズキャンセラーヘッドホン

波長を短くする方が、
回り込みや干渉を防げる



回路パターンは「ミクロの絵」
「ミクロの絵」を描く絵筆は細かいほどよい。



可視光 波長：380 ~ 780 nm
高圧水銀ランプの紫外光 → 250 nm
X線 → 1 ~ 0.01 nm (透過しやすい)

現状の問題点：微細リソグラフィー用に良い光がない

NEWS

CNET Japan

2003/12/02 23:12

「ムーアの法則」に壁
米インテル研究者が認める

今日チップメーカー各社が一般的に「ムーアの法則」と呼んでいるチップの性能の伸びが、まもなく壁に突き当たるといふ。それは20年ほど先の話である。

研究者がトランジスタのサイズ縮小の限界を理論付けるのは、特に目新しいことではない。しかし、Intelの研究者の発言だというのは珍しく、チップ設計者が現在直面している問題をなおさら浮き彫りにしているといえる。

- リソグラフィの限界 (光の露光の精度の限界)
- はたして安定に作動するのか

2020年のナノテクノロジー

「ナノ」は次世代技術の合い言葉

10 ³ キロ(k)	10 ⁻³ ミリ(m)
10 ⁶ メガ(M)	10 ⁻⁶ マイクロ(μ)
10 ⁹ ギガ(G)	10 ⁻⁹ ナノ(n)
10 ¹² テラ(T)	10 ⁻¹² ピコ(p)

髪の毛：0.08 mm = 80 μm (“ミクロン”)
 光学顕微鏡下ピンセットで摘める金導線：15-10 μm
 10 μm は、ただか、C60 サッカーボールなら 10000 個分

原子、分子って
 意外に大きいじゃん！

Nature, 382, 54 (1996).

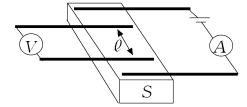
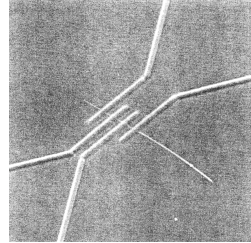
Electrical conductivity of individual carbon nanotubes

ナノチューブ 一本の伝導度を測定した！

T. W. Ebbesen*, H. J. Lezec†, H. Hiura‡, J. W. Bennett*, H. F. Ghaemi* & T. Thio*

* NEC Research Institute, 4 Independence Way, Princeton, New Jersey 08540, USA
 † Micrion Europe GmbH, Garmischer Strasse 4/V, 80339 München, Germany
 ‡ Fundamental Research Laboratories, NEC, 34 Miyukigaoka, Tsukuba 305, Japan

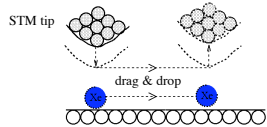
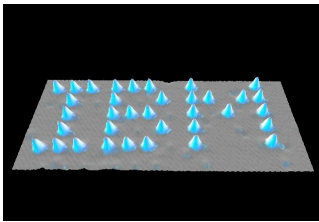
構造（太さ、ラセンのピッチ）に依存して、金属的伝導体や半導体がある。



$V = RI$
 $R = \rho (l / S)$
 ρ : 比抵抗
 (物質に関わる定数)

D.M. Eigler and E.K. Schweizer, Nature, 344, 524 (1990).

Nickel(110) 表面に、3 5 個のキセノン原子で字を書いた。



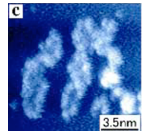
STM (Scanning Tunneling Microscope) の技術を使うと、原子レベルの観察のみならず、個々の原子を動かしたり並べたりできる。

DNA が電導性があり、分子導線に使えるのではないかと
 言っている人もいる



3.4(±0.2) nm x 10 = 34 nm

DNA 二重らせん構造のSTM観察



長さを制御した合成ポリマー --- ポリアセチレンの親戚から

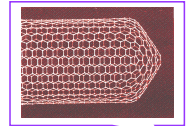
0.38 nm x 128 = ~ 50 nm
 0.38 nm x 256 = ~ 100 nm



ポリチオフェン

カーボンナノチューブ、長さはいくらでも。

数ナノメートルの直径をもつ



2020年のナノテクノロジー

現在、LSI の一つのトランジスターは ~1000 個の電子が移動することにより動作している。

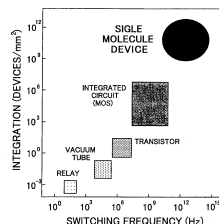
今後、集積度を ~1000 倍に高めたいのであれば、
1 電子で動作する単分子素子を利用することで解決できる。

計算速度と集積度の関係

パフォーマンス = 素子数 × クロック

高速応答の要求

1 THz 作動 → 光速 0.3 nm/psec
 10¹⁰ devices /chip → 2 nm²/device



2020年のナノテクノロジー

30 ~ 40 nm は、分子の大きさに迫っている！

- 導線 → 分子ワイヤー
- 論理回路 → 分子素子、分子コンピュータ
- 記録素子 → 分子磁石
- 情報伝送 → 分子光コネクター
- 表示材 → 分子LED
- 受光材 → 分子CCD
- 操作 → AFM, STM, SNOM, MFM

これからは分子工学の時代だ！

表1：ナノテクノロジーの市場予測（単位：億円）

	2005年	2010年
分子エレクトロニクス材料	26	2,214
量子デバイス	380	1,380
高密度記憶用磁気材料	27,075	95,812
光メモリ用材料	10,312	17,062
次世代超メモリー	5,051	16,309
薄膜製造装置	1,885	1,885
半導体製造装置	24,450	31,950
超精密加工装置	2,036	2,986
ナノメートル水準の検査機器	137	367
マイクロマシン	5,019	7,723
フラレン、ナノチューブ	145	291
インテリジェント材料	1,038	1,175
高選択性・高性能触媒材料	576	667
光触媒材料	576	1,810
分子設計タンパク質	150	177
バイオリアクター	609	1,380
遺伝子治療薬	4,346	4,510
遺伝子診断	350	1,071
医療用マイクロマシン	211	1,200
バイオセンサー	438	1,190
合計	84,810	191,159

http://mitsui.mgssi.com/compass/html/0105/toku_03.html

出所：
三菱総合研究所と
日本経済新聞社の
共同調査

2010年/2015年の国内ナノテク関連製品市場規模を予測

2006年7月20日
株式会社野村総合研究所

2010年に**5兆6,498億円**
2015年には**23兆612億円**に成長

技術者を応援する情報サイト

Tech-On! 2006/07/20 23:34

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20060720>

ナノテク関連製品市場規模の予測（国内生産ベース）		（単位：億円）		
予測対象項目（大分類/中分類）		2004年 （推計）	2010年	2015年
コンシューマ関連製品	スポーツ用品	31	217	351
	健康用品	90	313	624
	化粧品	8	294	567
	ナノ繊維・作品	48	1,120	1,917
小計	177	1,943	3,460	
自動車・自転車関連製品	(中分類も同じ)	103	2,404	5,867
	産業ロボット関連製品	(中分類も同じ)	68	2,349
歯科・整形・医療関連製品	歯科・整形外科用	14	189	538
	医療用	76	4,707	33,851
	小計	89	4,896	34,389
エレクトロニクス関連製品	集積回路	294	1,313	6,043
	磁気メモリ/光メモリ	74	1,560	4,864
	光部品	376	5,497	29,040
	電子部品	539	6,381	33,948
	小計	1,283	14,750	73,896
エネルギー・環境関連	燃料電池用部材	47	1,098	15,998
	リチウム二次電池用部材	83	554	1,131
	電気二重層キャパシタ	16	71	226
	太陽電池	22	1,961	8,131
	ナノ触媒	2,591	8,147	21,171
小計	2,758	12,331	46,658	
材料	無機材料	424	3,541	13,332
	高分子材料	487	3,187	6,489
	小計	912	6,728	19,821
計測および機器	ナノ計測装置	849	1,944	3,917
	ナノ加工・成膜装置	3,182	9,153	20,929
	小計	4,031	11,097	24,846
合計		9,421	56,498	236,612

目次

- 1) 電気通信大学における化学
- 2) 材料科学：エレクトロニクス志向の化学役に立っている材料科学
- 3) ナノテクノロジーって何？
 - i) 2020年の集積度
 - ii) 分子素子

静電気（電気分極）
光の波動的性質
リソグラフィー
10ⁿの接頭語（ナノ等）
を勉強しました

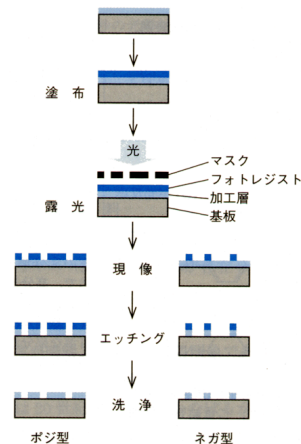
「まとめ」と皆さんへのメッセージ

- 1) 日本は資源のとれない加工貿易の国だ
- 2) 技術立国せねばならない、技術力において世界における地位を占める
- 3) 理科好きの若い人たちが増えて欲しい

技術立国日本の将来は僕に（私に）任せろ、
という若者たちが増えてくれたら嬉しい。

フォトリソ

リソグラフィー(lithography)の技術を用いて半導体の微細加工などに使用される感光性有機薄膜である。露光でのパターン転写後のエッチング工程で耐腐食性保護膜としての役割を果たすことから photoresist という名称がある。



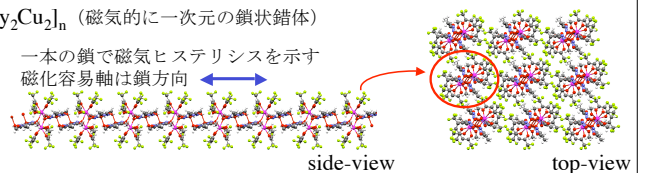
3d-4fヘテロ金属配位化合物を用いた単分子磁石

情報記録 → 単分子磁石 → 超高密度記録媒体
ナノテクノロジー

分子・電子・光子、1個で動作・機能する素子は、究極のダウンサイジング

[Dy₂Cu₂]_n (磁気的に一次元の鎖状錯体)

一本の鎖で磁気ヒステリシスを示す
磁化容易軸は鎖方向



これをもしHDDに使ったら？

