記事特集にあたって 本誌一般記事の本年度編集方針として、なるべく興味のあるテーマに関連した記事を集めて特集号とする方針が打出され、スタートしたのは御承知の事と思うが、本月号は最近特に目覚ましい発展をしている高分子化学工業に関連する問題を取上げてみた。即ちこの機会に高分子化学工業に対する認識を新たに、それと化学工学との関係について、高分子化学工業に携わる人や化学工学を志す人達に充分考えて貰いたいという主旨である。その為に現在高分子化学工業の先端に居られる数人の方に、夫々の立場における解説をお願いし、また本特集に関連して児玉信次郎氏の有益なる巻頭言も頂戴した。

しかし、お互に幅の広い分野を持つ高分子化学工業と化学工学との接点について、これを網羅し解説する事は限られた頁数では不可能であり、かつこの接点こそいわゆるノーハウに属し、各会社の機密事項になっている等の理由から、隔靴掻痒の説明となり、上記の主旨が充分活かされていない散漫な特集になっているかも知れない。しかしながらこの特集が、化学工学を志す多くの人に問題点を示すという意味で役立ち、近い将来に集大成せられるべき高分子化学工学の発展の一助ともなり、化学工学と高分子化学の谷間が少しでも埋められる努力がなされるならば幸である。

(編集 古谷 正之*・新保 卓而**)

合成高分子工業と化学工学***

古 谷 正 之*

1. 合成高分子工業の現状

第2次大戦後の20年間のプラスチック、合成ゴム、合成繊維などの合成高分子工業の発展はまことに眩目す

図1 1940～65年の世界の各種産業生産指数推移

べきものがあり、20世紀後半は宇宙時代、原子力時代であるとともに「合成高分子時代」とも言い得られ、今世紀の人類文化の進歩に貢献した化学技術の筆頭に上げうるであろう。

図1に1940年を100とする過去25年間の世界の各種産業の生産指数の推移を掲げたが、石油350%、自動車300%、鉄鋼230%、石炭150%に比して、合成高分子工業は実に950%とびはなれた成長率を示している。図2は同じく世界の品種別合成高分子の生産推移を示し、'65年のプラスチック約1000万トン、人造繊維約500万トン（内合繊150万トン）、合成ゴム約300万トン、計1800万トンに達し、その生産金額は約10兆円内外と推定される。

以下品種別にわが合成高分子工業の現状と特質を簡単に論じてみよう。

1.1 プラスチック

わが国の戦後経済は1945～55年（昭20～30）の復興期、'56～'61年（昭31～36）の高度成長期をへて、'62年（昭37）以降の転換期の調整段階に入って現在に至り、この間数回の景気循環を経験した。わが化学産業構造も

* Masayuki Furuya 古河化学工業（株）
 ** Takuji Shinbo 三菱化成工業（株）研究所
 *** 昭和41年3月8日 受理

復興期に肥料中心の無機から有機へと移りはじめ、ついで高度成長期に石油化学が勃興して急速にその体質の近代化が進められ、合成高分子工業の技術、規模とも国際水準に到達した。

表1は1950年(昭25)以降のわがプラスチック品種別生産推移を示し、1950年(昭25)に戦中のピークまでは回復し、以後各5年間ごとの平均成長率は'50~'54年(昭25~29)45%、'55~'59年(昭30~34)41%、'60~'64年(昭35~39)28%と、鉱工業平均をはるかに上まわる高度成長をつづけて続々新品種が増えている。またこの間に品種構成も著しく変化し、戦後熱可塑性樹脂の中でも、セルロイドのような半成品の後退に代わって、塩ビ樹脂を主とする純成品が急速に伸びたので熱硬化性対熱可塑性の比率が、1945年(昭20)の70:30から、'55年(昭30)の56:44をへて、'64年(昭39)には31:69と完全に逆転した。さらに熱硬化性ではフェノールよりユリアが伸びてほぼ1:4となり、熱可塑性では石炭化学型の塩ビの比重が1960年(昭35)ごろをピークに徐々に下り、代わって石油化学型のポリオレフィンとポリスチレン、とくに前者の伸びが顕著である。さらに原料面ではカーバイド依存の塩ビが、数年前から石油からのエチレンまたはアセチレン・エチレン併産方式に原料転換しつつあり、ポリスチレンなどでも原料ベンゼンをタール副産物から石油化学のB. T. X. に転換するなど、石炭化学から石油化学への移行傾向はますます強まっている。

近年全世界のプラスチック需要は予期以上のペースで急速に伸び、景気変動を無視して長期的にみれば、その平均成長率が5%をはるかにこえている。いま仮に今後10年間平均7%で成長するならば、1968年1350万トン、'73年1800万トン、1975年(昭50)には約2000万トンに達し現在のほぼ2倍となろう。そして1975年の予想需要の地域別構成は、およそ次のごとく推定される。

アメリカ、カナダの北アメリカ州	660万トン (33%)
西 欧	660万トン (33%)
日 本	240万トン (12%)
ソビエト、東欧などの共産圏	240万トン (12%)
その他諸国	200万トン (10%)

1.2 合 成 ゴ ム

世界の原料ゴム消費量は1900年にはわずかに5万トンにすぎなかったが、自動車工業の勃興につれて1920年20万トン、36年100万トン、40年150万トンと急速に伸び、戦後も'50年230万トン、'60年380万トン、'64年502万トンとテンポをゆるめず、'65年には532万トンに達した。第2次大戦前夜の1930年代に芽生えた合成ゴム工業は戦中、戦後に急速な成長をとげ、1963年にはとうとう合成ゴムが天然ゴムを追いこし、今後の原料ゴム供給の主導権は合成ゴムによって完全に握られるにいたった。しかも戦中から汎用ゴムの主流をなしたSBR(スチレンブタジエンゴム)に加えて、1960年代に入っ

図2 1940~65年のプラスチック、合成ゴム、人造繊維の生産推移

図3 1950~70年の自由圏世界の新ゴム消費実績

てシスポリブタジエン、シスポリイソプレンのステレオゴムが実用化され、さらに「第3の合成ゴム」としてエチレンプロピレンゴムの工業化が始まりかけている。天然一次産品である天然ゴムの性格から今後の画期的増産は期しがたく、合成ゴムの重要性は将来ますます重加するであろう。

図3は1950~70年の自由圏世界の新ゴム消費実績と需要予想を示し、1965年には天然ゴム237万トン、合成ゴム295万トン、計532万トンの新ゴムが消費され、合成ゴム使用率は55.5%であったが、'70年の新ゴム需要は600万トンをこえ、合成ゴム使用率は60%以上に達するであろう。これにソ連その他の共産圏を合わせた70年の全世界需要は、おそらく750~800万トンとなろう。

表 1 1950~1964 年 (昭 25~39) の日本のプ

年 度	熱 硬 化 性 樹 脂						熱 可 塑				
	フェノール 樹 脂	ニリア樹脂	メラミン 樹 脂	不飽和ポリ エスデル樹脂	フタル酸 樹 脂	小 計	メタクリル 樹 脂	塩化ビニル 樹 脂	塩化ビニリ デン樹脂	ポリビニル ホルマール	
昭											
1950 (25)	4,890	5,920	24		387	11,221	66	1,028			
51 (26)	6,560	10,935	68		852	18,415	331	4,101			
52 (27)	6,868	12,825	174		1,142	21,008	354	8,491			
53 (28)	9,789	18,951	792		2,236	31,768	600	13,857			
54 (29)	10,607	28,355	1,046	90	3,662	43,760	632	22,132			
55 (30)	11,010	39,932	2,389	225	5,450	59,006	600	32,370			
56 (31)	16,582	55,617	4,110	1,225	7,482	85,016	1,025	55,895			
57 (32)	19,322	70,382	6,057	3,182	8,926	107,869	1,583	108,538		212	
58 (33)	18,387	82,114	6,795	4,895	9,764	121,955	1,098	91,609		127	
59 (34)	29,407	107,499	8,669	9,263	13,075	167,913	1,791	179,661	1,740	275	
1960 (35)	42,341	127,644	11,571	14,146	19,207	214,909	2,822	258,081	2,393	330	
61 (36)	55,304	155,416	16,986	18,143	26,351	272,200	4,268	308,933	3,330	407	
62 (37)	56,166	178,308	21,234	20,566	30,237	306,511	5,349	303,502	3,244	313	
63 (38)	64,615	208,759	27,791	25,921	39,374	366,460	8,239	348,058	3,976	435	
64 (39)	74,622	241,815	33,833	33,350	47,752	434,372	11,183	473,835	10,005	452	

(注) 通産化工統計年報その他の資料による。* は会計年度, 他は暦年度

表 2 1961~65 年の世界のゴム消費推移 (単位, 千 Lt)

年 別	アメリカ	日 本	イギリス	西ドイツ	フランス	カナダ	そ の 他	計	
天 然 ゴ ム	1961	434	179	169	138	129	32	1,091	2,172
	62	470	193	165	148	127	35	1,089	2,228
	63	465	196	170	152	127	37	1,119	2,266
	64	489	206	182	155	127	40	1,055	2,256
	1965	528	197	183	159	119	44	1,137	2,367
合 成 ゴ ム	1961	1,120	85	123	122	97	64	340	1,951
	62	1,276	106	130	131	110	74	377	2,205
	63	1,328	128	141	145	125	85	438	2,390
	64	1,475	162	163	177	142	94	551	2,764
	1965	1,539	174	178	195	150	97	613	2,947
新 ゴ ム 合 計	1961	1,554	264	292	260	226	96	1,431	4,123
	62	1,746	299	295	279	237	110	1,466	4,432
	63	1,792	323	312	297	253	122	1,557	4,656
	64	1,964	368	346	332	269	135	1,606	5,019
	1965	2,067	371	361	354	270	140	1,750	5,314
(65年の合成ゴム使用率, %)		(74.4)	(46.9)	(49.3)	(55.2)	(55.6)	(68.8)	(35.0)	(55.4)

(注) 国際ゴム研究会統計月報

表 2 は 1961~65 年の自由圏諸国の新ゴム消費推移を示し, '65 年の日本の 37 万トンはアメリカに次ぎ第 2 位 (ソ連を加えると第 3 位) をしめた。

合成ゴム工業と石油化学とは密接不可分の関係にあることはいうまでもない。わが国で行なわれているナフサ分解によるエチレンプラントでは, エチレンに対して 16~20% のブタジエンが副生し, これを合成ゴムに消化することによってのみガスバラン스가とれ, オレフィンガスのコスト切下げが可能となる。SBR, NBR 用モノマーのステレン, アクリロニトリル, ブチルゴムのイソブチレンなども石油化学製品であり, 従来アセチレンから合成されたクロロブレンもブタジエンからの新合成プロセスが開発されている。将来エチレンプロピレンゴムが工業化されれば, 合成ゴム工業と石油化学の関係

は一層緊密となる。

1.3 合 成 繊 維

世界の人造繊維生産量は 1945 年の 62 万トンから, '55 年 254 万トン, '60 年 331 万トン, '63 年の 439 万トンに増加し, そのうちの合成繊維比率は '55 年の 10% から '63 年の 30% にたかまった。1940~63 年 (昭 15~38) の日本の人造繊維生産推移を図 4 に示し, 合繊は '58 年 (昭 33) ごろから急激に伸びて '63 年 (昭 38) には 24 万トンに達し, レーヨン, キュブラ, アセテートなどの化繊と合繊との比率が 66:34 に上がった。

図 5 は '50~'63 年の主要国の合繊生産量を表わし, 日本の 24 万トンはアメリカ 52 万トンに次ぐ第 2 位で, 第 3 位の西ドイツ 11 万トンを大きく離している。

ラスチック品種別生産推移 (単位 t)

性 樹 脂

ポリビニル ブチアール	ポリエチ レン	ポリプロ ピレン	ポリ スチ レン	酢酸纖維素 可塑物	セルロイド	ポリアミド	フッ素樹脂	小 計	合 計	1955年を 100 とす る生産指 数
				543	5,970			7,607	18,828	18
				1,195	7,060			12,687	31,102	30
				2,136	7,856			18,837	39,845	38
				1,821	7,470			23,748	55,516	53
				3,098	8,440			34,302	78,062	74
				5,569	8,258			46,797	105,803	100
				7,511	7,812			72,243	157,259	150
84			4,597	8,633	8,279			131,926	239,793	226
137	10,226		10,151	9,963	5,867	133	10.6	129,322	251,277	238
189	21,280		13,753	12,668	5,762	379	37.5	237,536	405,449	384
273	41,179		21,903	20,703	5,888	658	78	354,308	569,217	538
244	58,098		28,706	26,101	6,399	1,166	104	437,756	709,956	670
421	142,512		43,050	26,921	5,708	1,381	120	532,521	839,032	792
494	223,377	21,066	69,146	31,620	5,045	2,219	158	713,833	1,080,293	1,020
555	289,385	39,477	100,138	38,363	3,860	2,914	267	970,394	1,404,766	1,330

次に1963年の世界の合纖生産133万
トンの平均品種構成は、ナイロン55.1
%, ポリエステル19.6%, アクリル
16.1%, その他9.2%であったが、日
本の1951~63年(昭26~38)の合成
纖維生産構成の推移は図6のごとくで
ある。表3に合纖生産構成の国際比較
を示す。

図7は1961年の纖維個人消費量と
個人所得の関係の国際比較を示し、日
本個人消費量10.8kgは大体西欧の二
流国なみであり、低所得の割合には多
量の纖維、しかも人造纖維を消費して
いることが分る。

わが国の纖維需要見通しについて
は、通産省纖維局は1963年(昭38)
86万トン(うち人造纖維48%)から
'65年(昭40)100万トン(51%), '67
年(昭42)120万トン(52%)にのび
るものと予想しているが、おそらく
'70年(昭45)には150万トンをこえ、
人造纖維比率は60%に近づき、そのう
ちで化纖と合纖が相半ばするようにな
るのではあるまいか。

合成纖維工業もまた原料の石油化学
化が急速に進みつつある。アクリル纖
維のアクリロニトリル、6ナイロンの
カプロラクタム、ポリエステルテレ
フタル酸とエチレングリコールはもち
ろん、ビニロンの酢酸ビニルもまた従
来のアセチレン法からエチレン法への

図4 1940~63年(昭15~38)の日本の人造纖維生産推移

図5 1950~63年主要国の合成纖維生産推移

表 3 主要国の合成繊維生産構成比較 (単位, %)

品 種	日 本					1963 年 の 生 産 構 成							
	1951	1955	1960	1962	1963	世界平均	アメリカ	西ドイツ	イギリス	イタリア	フランス	ソ 連	
生 産 量 (千 t)	3.5	16	117	182	239	1,331	525	110	107	74	82	42	
ビ ニ ロ ン	86	33	20	19	16	—	—	—	—	—	—	—	
ナ イ ロ ン	14	45	34	32	33	55	62	50	53	70	56	66	
ア ク リ ル	—	—	19	15	15	16	18	23	14	10	14	27	
ポ リ エ ス テ ル	—	—	19	26	26	20	16	27	24	11	22	6	
そ の 他	—	12	8	8	10	9	4	—	9	9	8	1	

転換が計られつつある。

図 6 1951~63年(昭26~38)の日本の合成繊維生産構成推移

2. 合成高分子工業と化学工学

すでに指定紙数を超過したので結論をいそごう。合成高分子の科学と技術の進歩は、過去において2回の大きな技術革新を体験した。ここで図8と図9を見ていただきたい。すなわち第1期は1920年代後半から30年代を通じて第2次大戦までのラジカル重合技術を主とする高潮であり、プラスチックでは塩化ビニル、酢酸ビニル、メタクリル、ポリスチレン、高圧法ポリエチレン等々の一群の量産型熱可塑性樹脂を、合成ゴムではSBR, NBR ポリクロロブレン、ブチルゴムなどを、また合成繊維ではナイロン、ビニロンなどを生み出した。

第2期は1945~60年を中心として立体規則性重合技術を軸に展開され、プラスチックでは低中圧法ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリアセタール、ポリカーボネートなどが、合成ゴムではステレオゴム、エチレンプロピレンゴム、ポリエーテルゴムが、合成繊維ではポリエステル、アクリルなどが華々しく開花した。

現在は過去20年間に続々現われたような新モノマー、新品種、新重合技術などの第2期の技術革新ラッシュがすでに一段落し、少なくとも近い将来に上述のような画期的な大物がひょこひょことび出してくるとは考えがたい。したがって、たとえば既存モノマーのコストをプロセス転換やプラント大型化によって切り下げるとか、既存モノマーと既知の共重合、グラフトお

図 7 主要国の1961年の繊維個人消費量と個人所得の関係

よびブロック重合、立体規則性重合などの技術をうまく組合わせるか、あるいはポリマーブレンド、配合技術、化学処理などによって、最低コストで最高性能をうるように既存ポリマーを改質するとか、新しい加工装置、加工プロセスを開発して既存ポリマーの実用性能と加工生産性を向上せしめるなどの、わりに地味できめのこまかいダメおしの仕事が、こししばらくはわれわれ高分子技術者の主要な任務となるのではあるまいか。しかしこれは決してわれわれが消極的になることを意味するものではなく、今やっているような

ダメおしの仕事のうちに、次の技術革新を招来するポテンシャルを蓄積せねばならない。

一般に合成高分子工業は、高分子の製造工業（モノマー合成、重合および後処理工程）、一次および二次以上の加工工業、さらに加工製品の応用工業などに分けられる。

出発点となるモノマー合成は他の一般低分子有機合成と大差なく、既成の化学工学がフルに活用できるが、モノマーは次の重合工程の原料であるから、もちろん化学的になるべく高純度なることが好ましいが、その不純物にも、重合反応ならびに生成高分子の品質に対して、とくに微量でも有害なものと、ある程度まで含まれても許容できるものとがある。したがって特定の有害不純物は

とくに注意して ppm オーダーまで厳密に精製除去せねばならぬが、それほど有害でないものは収率やコストを考え合わせて、ある程度の妥協点で品質規格や工程管理計装費の適正規模を決める。またモノマーが蒸留その他の操作で一部重合して障害を起こすことがあるから注意を要する。

次の重合工程では重合反応装置設計や計装が問題となるが、化学工学者は具体的な設計に先立って重合反応の化学と生成高分子の構造、物性との関連性について十分な理解をもていただきたい。歴史の古いビニル系樹脂の懸濁重合や合成ゴムの乳化重合などについては、すでにプロセス、装置設計とも工業的に確立されつつある感があるが、有機金属化合物触媒などによる溶液重合に関

しては、歴史が新しいせいもあって、まだまだ改良の余地が残されているように思われる。

重合反応を終った生成物からの、未反応モノマーや溶媒の回収と精製循環使用、重合体の分離、汙過、洗浄、乾燥などのいわゆる仕上工程には、高粘度液体や固体の取扱いがからんで工業的に最も問題が多い。しかもこれらの問題の多くは、境界領域に属して理論が確立されておらず、研究室やベンチスケール、あるいはパイロットプラントのデータから、直ちに本装置の適正設計が困難な場合が少なくない。つまり本番でやってみなければ分からないのである。換言すれば工業化研究の開発費が案外多くかかるのもこの工程であり、われわれが巨額の金を払って買う外国技術のノウハウの価値ある主要部分がこの工程にあることが珍らしくない。今日なお輸入せねばならぬ外国機器の多くが、この仕上工程に用いられている。したがってこの分野の今後の開発を、とくに日本の化学工学者をお願いしておきたいのである。

合成高分子製造工業から供給される純高分子は、そのまま単体として加工製品に利用される場合もあるが、通常まず各種の配合剤を調合した配合物 (compound) を製造し、次の段階で広義の成形加工を行なって実用商品となる。プラスチックやゴムの混練、カレンダー圧延、押出、あるいは圧縮、移送、射出、中空などの成形加工、塗布などや、繊維の紡糸、紡織、染色仕上げなどの高分子の諸加工は、すべて各種の加工機械装置を用いて行なわれるが、合成繊維の高分子製造と紡糸加工が同一企業内で行なわれる場合を除けば、化学工学者が直接加工企業内で働いていることは珍らしい。すなわちプラスチックやゴムの加工企業では化学屋と機械屋が合作し、加工機械装置の設計、試運転は主として機械屋の手で行なわれている。

この理由は、一般にプラスチックや合成ゴムのような合成高分子製造企業や合成繊維企業は資本金数十億円以上の大企業であるに対して、プラスチックやゴムの加工企業は少数の総合プラスチック加工会社や自動車タイヤメーカーなどを除くと、資本金数億円～数千万円以下の中小企業の比重が圧倒的に大きいために、有能な化学工学者に十分な腕を振舞わせる余裕をもちえぬためであろう。また高分子加工機械の専門メーカーは比較的企業規模が小さく、大メーカーにおいても高分子加工機部門のみを抽出すれば、必ずしもその規模が大きくないので、大体機械屋に間に合わせて専任化学工学者の参加を求めるまでに至らないのが現状であろう。

しかし筆者は合成繊維以外の高分子加工の分野でも、

化学工学者の積極的協力によって初めて道が開ける未開拓の部分がかかなり広く残されているように感ぜられる。

戦後外国技術導入費はすでに 500 億円をはるかに超えるが、その約 1/2 近くが合成高分子関係と推定される。しかも前述のごとく新技術のラッシュが一段落したので、今後は海外の優秀新技術が金だけで買えなくなり、技術交換のいわゆるクロスライセンス方式でなくては、もはや良い技術が買えなくなってきた。また合成高分子関係の輸出の大勢も、高分子原料や加工製品輸出から、技術またはプラント輸出に大幅に転換しつつある。技術は国際商品であるから、それを買うこと自体がわれわれ日本技術者の恥ではないけれども、いつまでも輸入オンリーの片貿易をつづけるのでは情けない。そこで開放体制下の国際競争力を強力にするために自主技術の育成が強く叫ばれており、事実共産圏その他への技術輸出に成功したものもすべて国産技術である。

日本の高分子科学の水準はすでに国際なみであり、報文数において世界屈指の内に入り、海外からもきわめて高く評価されている。欧米の技術モニターも日本の学界に注目して、現に比較的安い対価で種を仕入れて、自国で開発しつつあるものを数例知っている。これはなんとしても国家的損失であり、わが化学工学者の奮起を待って、やはり工業化技術にまで仕上げて、価値高く輸出したいものである。

最後に大学や官公立研究機関などのアカデミックな化学工学者に、とくに次のことを要望したい。現場のポリマー屋のひが目かも知れないが、とにかく先生方はモデルがはっきり立てられ、実験データがとりやすく鮮かに数式化できて、スマートな論文になりやすいテーマをお好みになり、われわれが工場で日常苦しんでいる一見ぱっとしない複雑怪奇な境界領域の難問題は、なかなかすっきり割り切れないので敬遠されやすいうらみがある。できれば「きれいな網のハンカチ」に止まらないで、生産の流れの中にテーマを求めて、「汚れた雑巾」になる覚悟で天下っていただき、すぐさま定量的な理論にまでまともになくても、とりあえず定性的な方向づけに御協力下されば、わが国の自己技術確立のためにどれだけ力づけられるか知れない。もっともこのような産学共同体制を作るには、われわれ現場技術者の側からも、生産に関する難問題をなまの姿で提示しないで、われわれの能力でできる限り十分に解析して、アカデミックな先生方の食慾をそそるテーマに整理抽出する工夫と、たとえ一度や二度は断わられてもあきらめないでアプローチをつづける努力を惜んではなるまい。