

# 科学衛星用電子部品・材料

齋藤成文\*・後川昭雄・高橋慶治

## 1. ま え が き

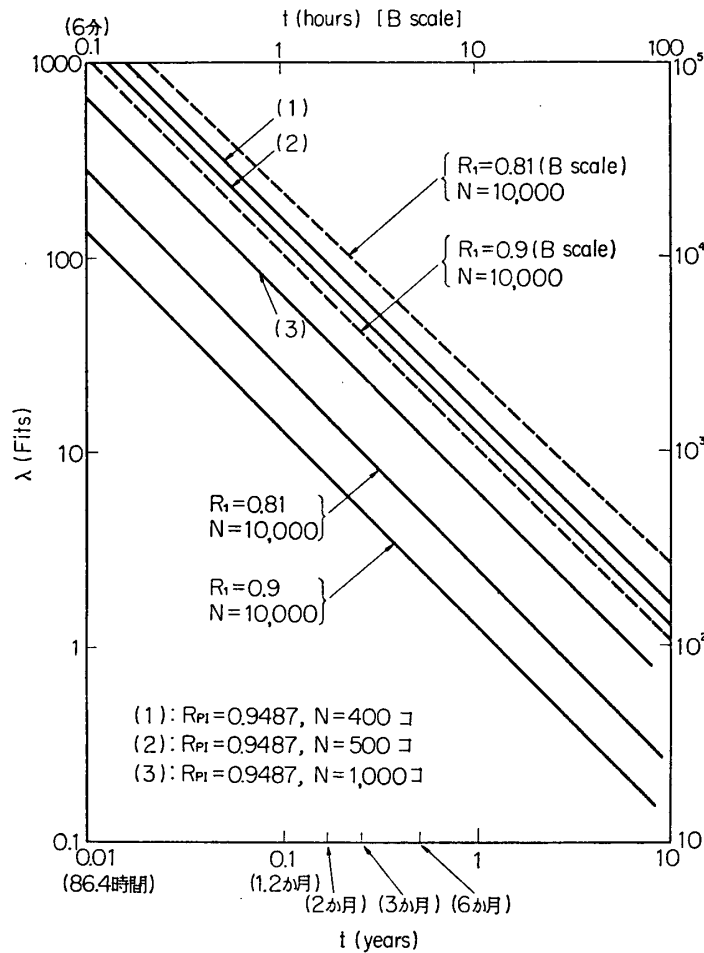
衛星用部品としては 1) 超高信頼性 2) 重量・容積の制限 3) 低電力化 4) かこくな宇宙環境(熱・真空, 放射線照射, 衝撃, 振動)のもとでの適正動作等の諸条件が必須のものとなってくる。これらの要件は互に密接に関連しているので問題は複雑であり, また未経験のことがらも多いので, まず基本的考え方を確立した上で各種シミュレーション・テストを実施, 諸資料を入手しつつ P-2 以後の設計に活用している段階である。以下それぞれについて問題点と, これまでに得られた結果の一部を紹介したい。なお, 前記4条件を考える場合集積回路の採用・従来回路の置換えは最近の高信頼性の実現, 微小電力化, 価格低下の傾向にささえられて重要性 [1] が増し, 検討も始められているがここでは触れない。

## 2. 部品への要求・試験

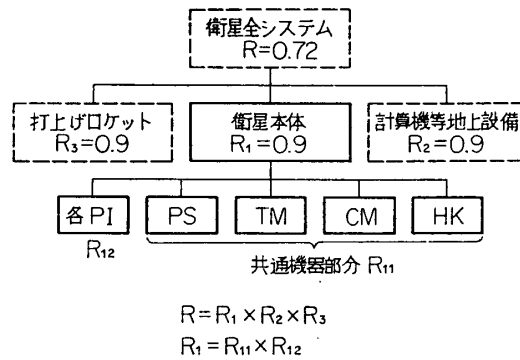
### 2.1 高信頼性 [1] [2]

衛星の打ち上げは多額の費用を要し, 観測期間もたとえば1年と長期間を要求されるだけに信頼性問題はきわめて重要となってくる。打ち上げ前, 打ち上げ時, 軌道飛行中の3期間のうち, なかなく, 軌道飛行中の寿命が最も重要で衛星の信頼度設計を支配する。しかも重量, 電力を考えると広範囲の冗長性は望めず実際的には使用素子の信頼性に大きく依存してくる。P-1 の部品表によると部品総数は約 14,000 であるが, いま信頼度試算のため信頼度 90%, 衛星本体部品数を10,000とすると寿命一年の衛星用に要求される平均故障率は 1.2 Fit (0.00012%/1000 時間) となる。信頼度を 81% に格下げしても 2.5 Fit, さらに寿命を 1.2 か月に短縮しても 26 Fit が要求され, 要求はきわめてきびしいものがある。(もっとも消極的に観測装置1種類が働いた場合を想定, 図-1 のブロック図のごとく衛星本体の信頼度 90% を共通機器部分との2部分で分担するとして該当観測器の信頼度 95%, その部品数平均 500 と仮定しても寿命1年で 12.2 Fit, 3か月でも 49 Fit が要求される)。しかも将来は衛星のシステムもより複雑になりまた, 飛行時間も長時間の方向へ発展することを考えると, こうした条件はきびしくなりこそすれ, ゆるめられることはない。そこで根拠のはっきりしたものを使用し, かつ故障の場合の原因究明を徹底させるという基本方針に基づき, 品種・メーカーを選定した推奨部品を定め, 部品の標準化に努力した。とくに共通的に使用量が多いといった部品側と衛星機能上重要な部分といった搭載機器側との2側面から優先重要度をそれぞれ3段階づつに分けて考え, 信頼性確保の困難な部品の除去ならびに是正から始めた。この場合特に時間的問題もあったので信頼性で最高レベルにある電々公社の地上用(電子交換)での実績を反映できることも考え, main contractor の各専門部品担当部を中心に, それぞれ最高水準の部品メーカーの協力も得て信頼度保証の部品を供給する態勢をとって

\* 宇宙研併任教授(東大生産研)



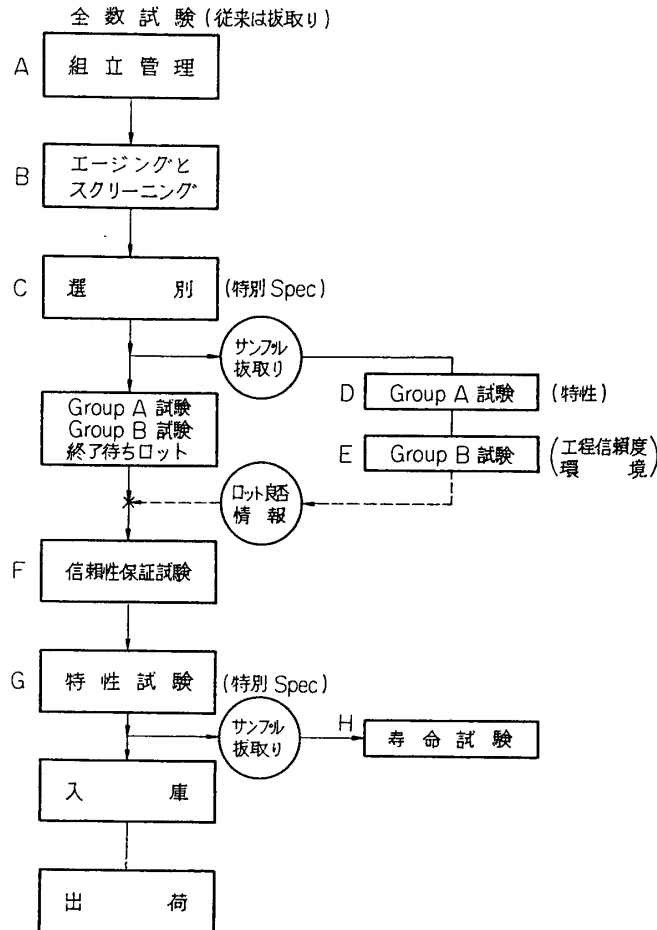
第1図(a)  $\lambda_{ust}$



第1図(b) 1年間動作に要求される衛星系の信頼度

る。半導体素子関係は Si トランジスタ等 8 品種を中心に接合形電界効果トランジスタも含めて標準化は典型的に進み、多品種少量需要の傾向が強い C, R, L, トランス等はかなりの努力を要し、リレー、マイクロスイッチ、コネクタなどでは一部外国品を用いるものもあったためテスト仕様書によって初期故障も除き信頼性評価を行なう手順によったが原則的には共通仕様書が作られ、製造工程の各段階から特に衛星用として管理し、かつ厳密なスクリー

ニングおよび完成品に対する全数非破壊テスト（サンプルのときは破壊テストを含む）、環境試験、信頼性保証試験を経て、故障率の推定を行ないまた一方各段階の部品故障の報告・分析を行なうことにしている。P-2 に対しては全面的にこれら信頼性保証部品が活用され、



第2図 衛星用半導体部品の信頼度保証

P-1 搭載機器の各モジュール running テストの進行とともにスペース・チェンバーによる Sub-Assembly 段階の環境テスト、重要部品の寿命試験と認定、特別部品のテストも計画されている。最後になったが、充てん材、絶縁材料、電線その他についても放出ガスの問題から始め各種試験・調査選定が活発に進められ、供給態勢も整備された段階である。一部高圧用部品、精密巻線抵抗、ボリューム等検討をさらに要する問題もあるが対策は着々と進められている。

## 2.2 放射線試験 [3]

本試験は衛星用として選定した各種部品・材料および回路の放射線（電子、陽子、中性子、 $\gamma$ 線）、X線、紫外線などによる性能の低下度を実験によって、定量的に確認し、放射線損傷の最小のものを選定すること、またしゃへいや回路設計上の工夫によって耐放射線性を強化して、1年以上の観測を可能にする目的で行なった。そのうちとくに放射線環境として重

要となるのは、バン・アレン帯と高空核爆発実験によって生じた人工放射線帯である。バンアレン内帯中心部のみに滞在すれば、1年間におよそ  $6 \times 10^{12}$  proton/cm<sup>2</sup> ( $E_p > 30$  MeV) の照射を受けると考えられる。また人工放射線帯から OSOI (近地点 552 km, 遠地点 594 km 傾角 33°, Mar. 1962) が受けた推定線量は1日に  $6.8 \times 10^{11}$  electron/cm<sup>2</sup> であるとされているので、その減衰を考慮して1年間に  $3.6 \times 10^{12}$  electron/cm<sup>2</sup> と見積ることができる。このような放射線環境を地上でシミュレートして多くの部品をテストすることは容易でないが、幸い出力の制御・照射スペースの点ですぐれた立教大学のトリガ型原子炉によるこれと等価な速中性子照射で代用した。表1のごとき照射段階、資格試験レベルを定めて、損傷の程度

第1表 立大トリガ炉による放射線照射テスト条件

条件	照射量 (熱出力)	全線量	備考
1)	100 kW 6分	$3 \times 10^{13}$ n/cm <sup>2</sup>	バンアレン帯中心部を1年間飛しょう
2)	1 kW "	$3 \times 10^{11}$ "	資格試験レベル
3)	10 W "	$3 \times 10^9$ "	500 km 軌道を1年間飛しょう

第2表 同一放射線損傷を与える等価量

	n/cm <sup>2</sup>	p/cm <sup>2</sup>	e/cm <sup>2</sup>	Co <sup>60</sup> - $\gamma$ (Rads)
1 n/cm <sup>2</sup>	1	0.3	$1.2 \times 10^3$	$8 \times 10^{-5}$
1 p/cm <sup>2</sup> (30 MeV)	3	1	$4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4}$
1 e/cm <sup>2</sup> (1 MeV)	$8 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-4}$	1	$6 \times 10^{-7}$
1 Rad Co <sup>60</sup> - $\gamma$	$1.2 \times 10^4$	$4 \times 10^3$	$1.7 \times 10^7$	1

第3表 太陽電池とトランジスタのプロトン照射

太陽電池	$I_s/I_{s0}$	陽子 (p/cm <sup>2</sup> )								中性子 (n/cm <sup>2</sup> ) 炉内速中性子
		53 MeV	R.D.E.	46 MeV	R.D.E.	32 MeV	R.D.E.	21 MeV	R.D.E.	
N/P 型	0.8	$2.4 \times 10^{11}$	0.8	$2.1 \times 10^{11}$	0.7	$1.2 \times 10^{11}$	0.4	$1.0 \times 10^{11}$	0.3	$3.2 \times 10^{11}$
	0.5	$5.2 \times 10^{12}$	1	$4.8 \times 10^{12}$	1	$2.5 \times 10^{12}$	0.5	$1.7 \times 10^{12}$	0.3	$5 \times 10^{12}$
トランジスタ	$h_{FE}/h_{FE0}$	陽子 (p/cm <sup>2</sup> )								中性子 (n/cm <sup>2</sup> ) 炉内速中性子
		53 MeV	R.D.E.	46 MeV	R.D.E.	32 MeV	R.D.E.	21 MeV	R.D.E.	
2 SA 417	0.8					$4.8 \times 10^{13}$	0.2	$1.7 \times 10^{13}$	0.1	$2 \times 10^{14}$
2 SB 225	0.8	$4.8 \times 10^{11}$	0.2	$2.9 \times 10^{11}$	0.1	$2.4 \times 10^{11}$	0.1	$1.1 \times 10^{11}$	0.1	$2.3 \times 10^{12}$
2 SC 94	0.8	$2.3 \times 10^{12}$	0.7	$2.0 \times 10^{12}$	0.6	$1.2 \times 10^{12}$	0.4	$8.7 \times 10^{11}$	0.3	$3.3 \times 10^{12}$
2 SC 320	0.8	$4.4 \times 10^{12}$	0.4	$2.8 \times 10^{12}$	0.3	$2.3 \times 10^{12}$	0.2	$1.7 \times 10^{12}$	0.2	$1.0 \times 10^{13}$
2 SC 568	0.8	$6.4 \times 10^{12}$	0.4	$5.0 \times 10^{12}$	0.3	$3.1 \times 10^{12}$	0.2	$2.5 \times 10^{12}$	0.1	$1.6 \times 10^{13}$

R.D.E.: Radiation Damage Equivalent

を検討したが、なお等価性（表2参照）が重要であるので速中性子と陽子の放射線損傷比による等価総量を求めるため東大核研のシンクロサイクロトロンでトランジスタ、太陽電池を用いて比較照射試験も行なった（表3）。このように最初は部品段階で評価し、次に回路に組み込んだ段階で中性子照射を行ない動作試験によって判定をした。また材料に応じて $\gamma$ 線電子線など他の照射試験も実施した。

### 3. 太陽電池

#### 3.1 P-1用太陽電池

電源としては特に paddle は使用せず衛星表面の Si 太陽電池によって、Ni-Cd 電池を充電する方式を用い常時消費可能な電力を約 10 W として計画を進めたので、まず太陽電池系から取り出しうる電力・必要枚数・衛星の直径の検討から始めた（表3'参照）。安定化回路

第3'表

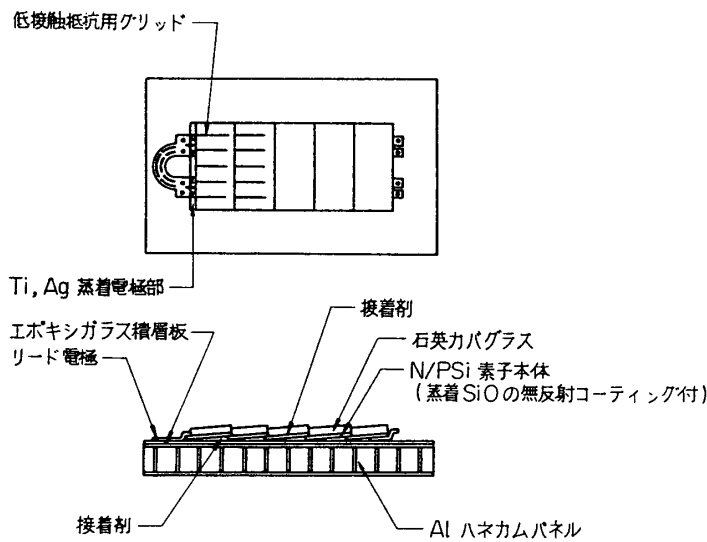
		Regulator 出力				
		24V方式	±12V方式		±12V方式	
			+	-	+	-
		10W	6W	4W	7W	3W
S.C. パワー(W)		22.5	13.7	9.2	16.0	6.9
S.C. の実 働枚数	$\eta=8\%$	1160	710	480	830	350
	$\eta=6.5\%$	1550	950	640	1110	470
衛星の 直径(cm)	$\eta=8\%$	74	75		74	
	$\eta=6.5\%$	81	82		82	
Ni-Cd セル数		29	15	15	15*	15
放電 depth (%)		6.9	8.3	5.5	5.8	4.1
充電電流 (A)		0.253	0.303	0.21	0.355	0.152
充電時間率 $\gamma=Q/I_c$ (h)		11.9	9.9	14.3	14.1	19.7
Ni-Cd セル重量 (kg)		5	5.2		6.5	

\* Ni-Cdセルとして 5 Ah (S108) を使用, \* のないのは全て 3 Ah (S103).

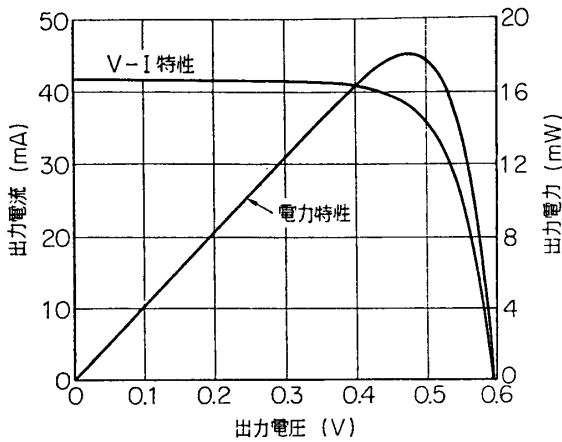
の効率を 90%, 二次電池の充電効率を 85%, 太陽電池の効率を 6~8%, さらに衛星の 1 周期を 90 分として、その 57 分（最低日照率 63% 相当）は太陽に照らされ、33 分は地球の影に入っていると仮定すると、太陽電池の出力として約 25W を必要とする。これだけの出力を得るためには 10 mm×20 mm の太陽電池素子を衛星表面にはり付けるものとする。その数は約 5000 枚となり、面積利用率を約 50% とすると衛星の直径として 75 cm は必要という結果が出る。二次電池としては、3 Ah の密閉型焼結式電池を 15 個直列接続したものをそれぞれ正電圧用、負電圧用に 2 組用いている。

プロトタイプ 1 号では、耐放射線性と高能率を目的として 10 mm×20 mm×0.3 mm の標

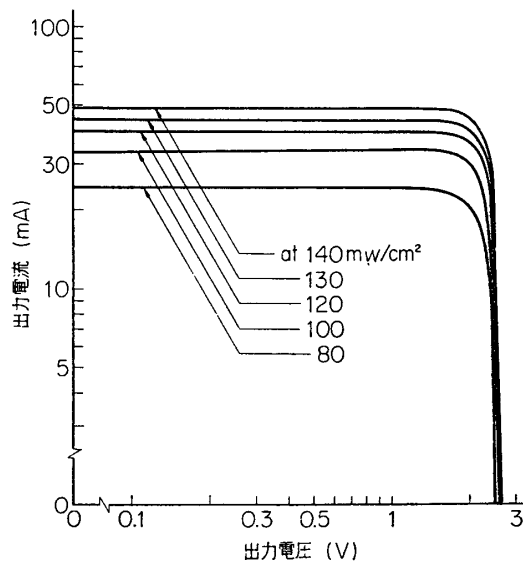
準形，低接触抵抗用グリッド電極付きの N/P セルを図3のごとく屋根瓦状に5枚直列にした“Shingled module”とした．比抵抗  $1\Omega\text{cm}$  の P 形 Si を母体とした素子の表面は，放射線対策を完全にするため，その性能を表4，図5に示した紫外・赤外阻止フィルタ付き石英ガラスでおおい，さらに反射防止膜がコーティングされている．以上の太陽電池では，特性として図4から明らかなごとくたとえば  $100\text{mW}/\text{cm}^2$  の光照射時の最大電力  $18\text{mW}$  程度を得ている．寿命で第一に問題となるのは放射線による性能低下であるが，速中性子線照射の結果で N/P 形素子の方が P/N 形より一けた耐放射線性が高いこと，および放射線量と（短絡電流で見た）性能保存度 ( $I_s/I_{s0}$ ) の関係を明らかにした．すなわち性能保存度は資格



第3図 P-1 用太陽電池構造図



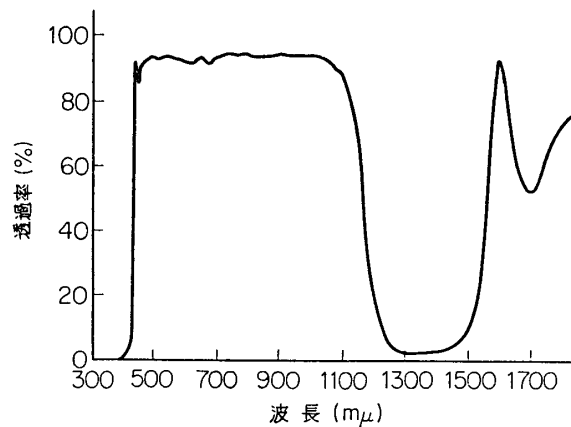
第4図(a) 太陽電池の出力特性



第4図(b) 太陽電池モジュール，電圧一電流特性 (Xe lamp 使用)

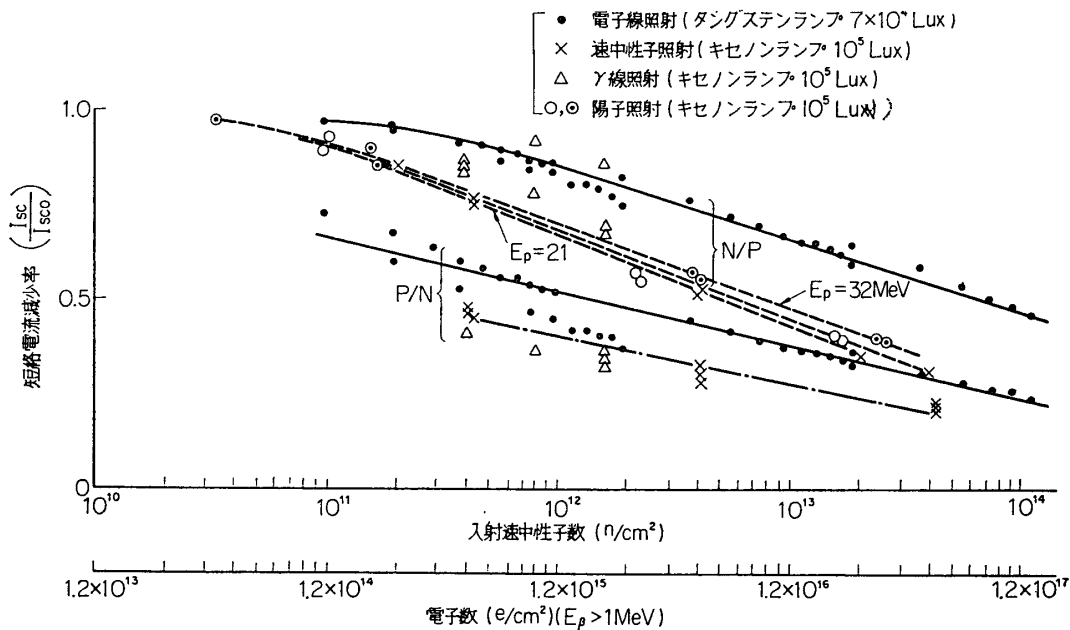
第4表 カバーガラスの特性 (208 SCC 435-2-1.15)

項 目	規 格
材 質	7940 Fused Silica
寸 法	9×20×1.5 mm
U. Rejection	1%以下 (300~400m $\mu$ )
Cut on	435±15 m $\mu$
Cut off	1150±40 m $\mu$
透 過 特 性	92% min ave (600~800 m $\mu$ ) 92% min ave (355~485 m $\mu$ )
I. Rejection Rejection Bandwidth	340 m $\mu$ min
Trans. at Peak Rejection	5% max



第5図 カバーガラスの光学的特性

試験レベル  $3 \times 10^{11}$  [n/cm<sup>2</sup>] でも約 86% で、500 km 軌道では問題ないことがわかった。図6には、その他電子線、 $\gamma$ 線、陽子による照射結果も併記したが、第0近似では、陽子 ( $E_p=21$  MeV) と速中性子の等価損傷比 0.3 を得、速中性子によるシミュレーションテストの有意性を確認した。また地上用とは著しく異なり、表面部品として(太陽の照射下と地球の影とに入るため)高真空中でかなり振幅の大きい熱的ストレスを長期間繰り返し受けるなど衛星中最もかこくな環境にさらされる。しかも上記構造の示す通りカバーガラス、Si素子、電極、エポキシパネル、Alハネカムパネル、接着材等の複雑な積層複合体であり、各層の熱的諸性質によって特に悪い場合には劣化・破壊を生ずることもあった。そこで太陽電池検討会を結成して宇宙用太陽電池の製作・試験法をいかにすべきかから出発して熱応力と構造強度面よりの検討、各部材質強度と構造・構成法、接着材関係、ハネカムパネルの特性等を吟味するとともに各種条件の素子自体ならびに実装したパネル段階での熱・真空・光環境によるシミュレーション・テストを低温範囲を広げて繰り返した。



第6図 各種放射線による太陽電池の特性

### 3.2 P-2 用太陽電池

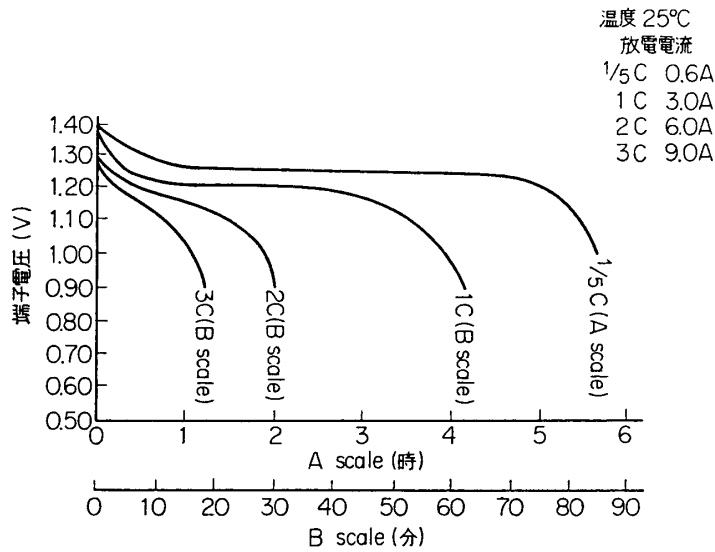
以上の P-1 製作・試験の結果，設計の一部を下記のように改善した．i) 比抵抗を上げて耐放射線性を向上，ii) カバーガラスの厚さを薄くし，素子に与えるひずみを減少させて信頼度を向上させるとともに重量および実装の困難さをも軽減した．（なお衛星軌道を近地点 500 km，遠地点 1500 km，傾角  $30^\circ$  と仮定しても性能保存度は 90% 以上となりこの厚さでも耐放射線性は十分と考えている）．iii) 実装は平板式に変更し，かつ柔軟性のあるメッシュ電極も採用して熱衝撃や振動対策を強化した．また接着材も硬化剤の量，キュア温度，および時間を変えて接着強度と伸びなどの面から信頼性を向上させるべく検討している．

## 4. Ni-Cd 蓄電池

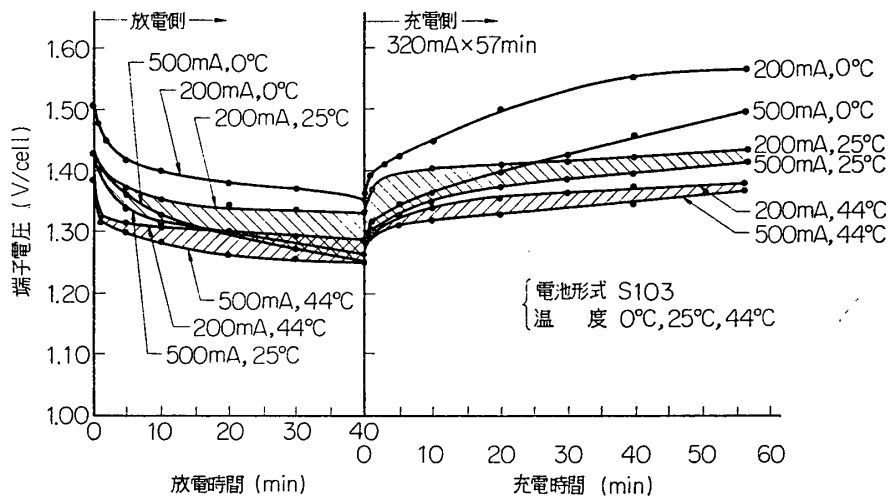
i) 第1には単一形電流容量 3 Ah の，S103 をセラミックシール化による完全密閉形焼結式とした宇宙用を開発した（図 7，8 参照）．周囲温度が  $0\sim 44^\circ\text{C}$  で適正充電量試験，過充電試験等の性能試験を行なったが，なお  $5^\circ\text{C}$  においては規定充電電流の 4 倍に当る 1.2 A の過充電でも，また真空 ( $1\sim 2\text{ mmHg}$ ) 下の電池温度，電池電圧も問題はなかった．一番問題となる寿命試験はまず以上を参照して次の条件を決定，過充電率 120%，0.32 A で 57 分充電，0.46 A で 33 分放電（放電深度 8.4%）のサイクル試験で開始，昭和 41 年 12 月で衛星条件 1 年に当る 6000 サイクルを異常なく経過し，また低温過充電試験 ( $-10^\circ\text{C}$ ，400 mA 連続 30 日) でも順調な結果を得た．また  $3\times 10^{13}\text{ n/cm}^2$  の速中性子線照射でも下記の 3500 RSB 同様劣化は見られず，さらに急速充電法の基礎検討がすみ，一応の見通しを得た．

ii) 他の形としては単一形 3.5 Ah の円筒型ナイロンシール薄形焼結式 3500 RSB 中心に数種の寿命試験が先行していたので，上記条件による寿命試験を併行し，6200 サイクルを





第7図 S103C形コラム Ni-Cd 電池放電特性



第8図 充放電サイクル特性 (温度の影響)

経過した。なお真空 ( $\sim 0.1$  mmHg) 下で 5700 サイクル, 200% 過充電で 3400 サイクルを異常なく経過, 先行寿命試験では放電深度 40% でも 9400 サイクルを経過した実例が得られ, 寿命は明るい見通しを得た。この形は温度範囲は多少狭く, 電池収納容器の完全密閉を行なうもので, なお 2 時間率の過大電流 (正規の 5 倍) で, 連続過充電の可能性を特長とする 2.3 Ah 角形焼結式も開発されつつある。

### 5. 回路素子

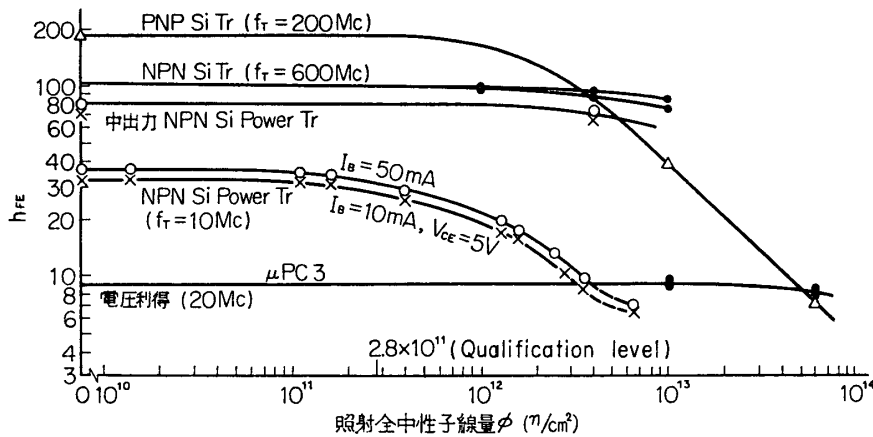
2章においてすでに関連事項は述べておいたので補足的につけ加える。

#### 1. 半導体素子

放射線試験の結果, ダイオード類は, やや飽和電流が大となるが, ほぼ問題ない。GePNP

第5表 半 導 体 標 準 品

	品 種		品 種
1)	定電圧ダイオード	6)	} パワートランジスタ
2)	小信号用ダイオード	7)	
3)	太陽電池逆流防止用ダイオード	8)	高周波パワートランジスタ ( $f_T=500\sim600$ MC)
4)	小信号高周波用 NPN トランジスタ ( $f_T=1,100$ MC)	9)	Ge gold bond ダイオード
5)	低電流, 高 $h_{FE}$ 用 PNP トランジスタ	10)	接合形電界効果トランジスタ (Nチャンネル)



第9図 Si トランジスタの速中性子線照射特性例

トランジスタでは  $h_{FE}$  の低下,  $I_{CBO}$  の増加で動作点のずれ, 劣化を伴うので,  $3 \times 10^{13} n/cm^2$  では使用不可能となる. Si NPN プレーナトランジスタでは  $h_{FE}$ , 飽和スイッチオフ時間の減少,  $V_{CE(sat.)}$ , ダイオード順方向電圧降下, NF の増加が見られ, 耐放射線性は, 比抵抗小, 同程度の  $f_T$  なら  $h_{FE}$  の初期値小の方がよいことが確認された.

以上の結果と, 機械的信頼性も考慮した表5に含まれる推奨品を選び, 変位効果, 表面効果, 電離効果等の調査のために照射時静特性を測定した. この結果, 図9の  $h_{FE}$  対  $\phi$  特性のごとく, 電源回路用では NPN Si パワートランジスタが予想より早く  $10^{11} [n/cm^2]$  から劣化傾向を示す (500 km 軌道相当では問題ない). また PNP 形の方が NPN 形より弱いことがわかった. FET 関係では, MOS トランジスタのドレイン電流大の方が照射量と共に  $I_{DS}$ ,  $g_m$ ,  $V_T$  (ピンチオフ電圧), 出力コンダクタンスが増加はするが, 初期値の大きいものは小のものより変動は少ない. 更に Transient 効果にゲート漏れ電流  $I_{GSS}$  の増加を認めるが,  $I_{DS}-V_G$  特性では Transient effect はなく, その増大は Permanent damage と考えられ, 接合形 FET が上記パラメータで若干減少の傾向を持つものの, その変動は少ないので耐放射線性の見地からは, MOS トランジスタよりすぐれている.

### 5.2 受 動 素 子

R, C, L のほか, リレー, コネクタなど概して耐放射線性に問題は少なかったが, 品種が

多いだけに標準化はめんどろであった。P-2用部品の使用条件、工事仕様などの調査を行ない、第1次の標準8品種、すなわちソリッドタンタル、ポリスチレン、シルバードマイカ、ポリエチレンテレフタレート、セラミック（温度補償用および高誘電率用）の各コンデンサと炭素皮膜、金属皮膜の各抵抗を内定し、次に、ガラストリマ・コンデンサとモールド形ソリッド抵抗を追加、4社に絞った。また原則として Derating はコンデンサについては50%、抵抗では、パワーと信頼性の点から50% ずつを考慮することになっている。またコイル、トランス類はC, R と違いむしろ装置部品と考えねばならず使用材料の段階から、工程管理の必要性が痛感されたのでコアと線材といった材料専門メーカーを選定しP-2用部品に関し、特性、構造、線材、実装法を調査ののちまずコアについては3品種に絞り放射線テストの再評価から始めた。巻線材については、真空下電子線照射による中性子線との比較評価を行なって、推奨品の選定を終えた。

以上の成果はSA研究会の各位のご協力によるもので、ご指導ごべんたついただいた高木所長始め平尾・野村両教授、林助教授、とくに太陽電池検討会の河田・植村両教授、大島・砂川・三浦各助教授、日本電気関係各位、立教大学佃・高見両氏を中心とするSA-9各位ならびにSA-7関係各メーカーの委員の方々に厚くお礼申し上げます。

1967年2月7日 宇宙工学

#### 参 考 文 献

- [1] 野村，後川：“(超小形回路の)スペース・エレクトロニクスへの応用”信学誌 49, 4, (昭.41~04) p.140
- [2] 後川：“宇宙通信機器の信頼度設計”電子技術, 7, 9, (昭.40~09) p.157
- [3] 後川：“スペース用電子部品・材料の耐放射線特性”電子材料, 4, 6, (昭.40~06) p.14