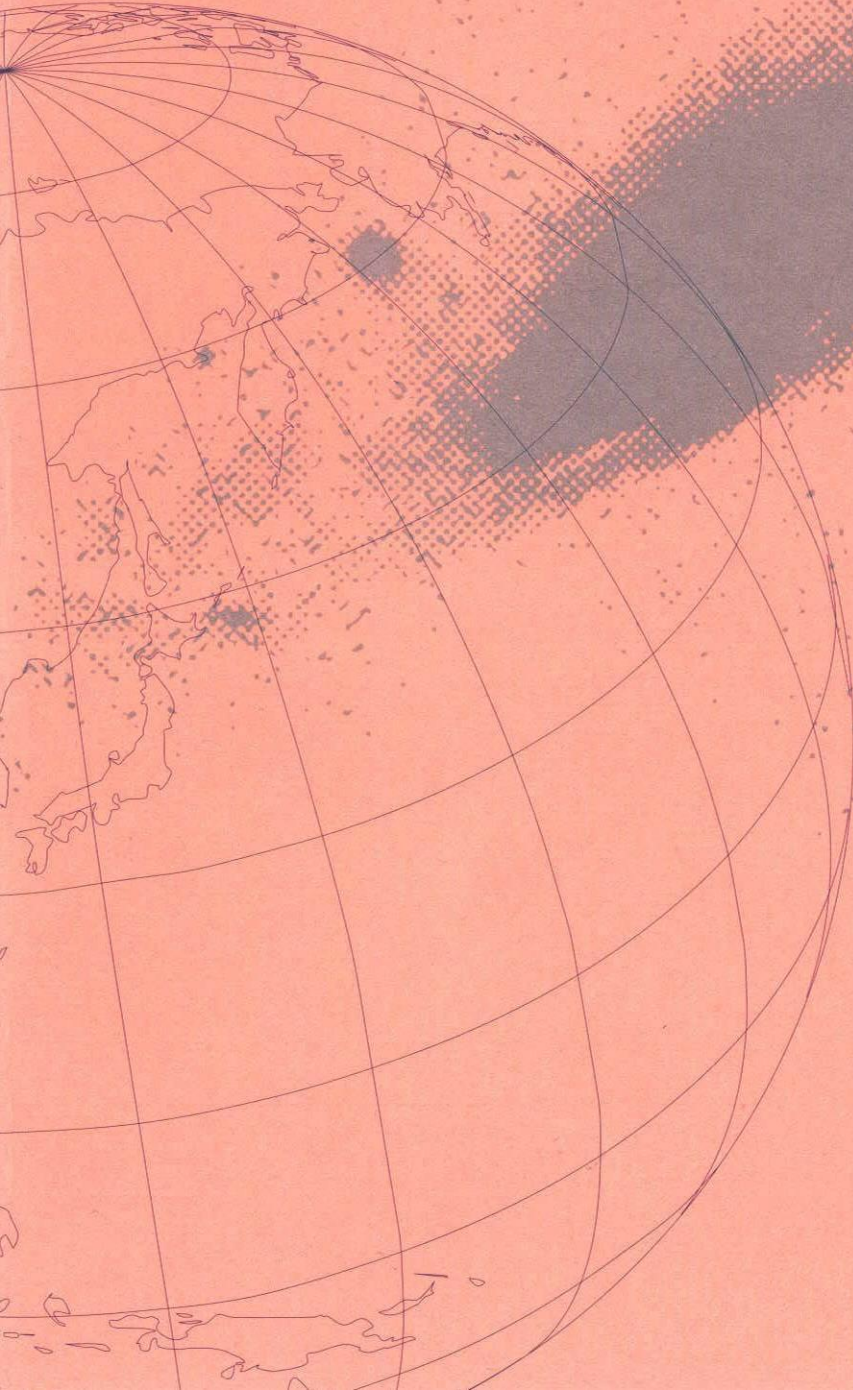


宇宙航空研究開発機構研究開発資料

赤外線遮断を考慮した 太陽電池発電量に関する簡易解析



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

赤外線遮断を考慮した太陽電池発電量に関する簡易解析

Fundamental Analysis on Solar Cell Power
Generation Considering Infrared Cut-off

遠山 伸一
Shinichi TÔYAMA

総合技術研究本部 システム評価技術グループ
Space Systems Evaluation Engineering Group
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月
March 2004

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

和 文 抄 録	<p>宇宙太陽発電 (SSPS)の発電電部では、熱制御系の重量軽減が必須であり、その可能性の1つとして、太陽電池の分光感度を利用した太陽光赤外部の除去がある。しかしながら、結晶シリコンセルなどは赤外線にも感度があるので、不適切な赤外線遮断は、入射太陽エネルギーを有効に使用しないことになり、発電システム重量の増加をもたらす可能性もある。</p> <p>今回の評価では、アモルファス、微結晶、結晶の3種のシリコンセルを対象として、太陽光カットオフ波長依存性を数値計算し、太陽光赤外部除去の効果を簡易的に評価した。</p>
和文キーワード	<p>太陽電池、太陽光スペクトル、シリコンセル、分光感度、発電量、太陽光赤外部遮断、断熱フィルム</p>

目次

1. はじめに.....	1
2. 解析の方法.....	1
2. 1 太陽光エネルギースペクトルの仮定.....	1
2. 2 太陽電池感度の仮定.....	2
2. 3 分光発電量の算出.....	2
2. 4 赤外線カットオフ依存性の計算.....	2
3. 計算結果.....	3
4. まとめ.....	3
補足1. 断熱フィルムについて.....	4
参考文献.....	4

赤外線遮断を考慮した太陽電池発電量に関する簡易解析

1. はじめに

宇宙太陽発電 (SSPS) の発電部では、熱制御系の重量軽減が必須であり、その可能性の 1 つとして、太陽電池の分光感度を利用した、太陽光赤外部の除去が考えられる。その具体的な方法は、入射する太陽エネルギーの赤外成分を効率よく反射ないしは透過するフィルタの設置することである。このようなフィルタは、断熱フィルム等の名称で建築資材として現在市販されている。しかしながら、結晶シリコンセルなどは赤外線にも感度があるので、不適切な赤外線遮断は、入射太陽エネルギーを有効に使用しないことになり、発電システム重量の増加をもたらす可能性もある。

今回の評価では、アモルファス、微結晶、結晶の 3 種のシリコンセルを対象として、太陽光カットオフ波長依存性を数値計算し、太陽光赤外部除去の効果を簡易的に評価した。

2. 解析の方法

解析では、太陽電池の発電効率を波長に依存して算出する必要がある。そのため、太陽光エネルギースペクトルおよび太陽電池の分光特性が必要がある。

解析の手順は、以下のような簡易的な方法を用いた。

- ① 太陽光スペクトルを仮定する。
- ② 太陽電池のエネルギー変換効率のため、分光特性を仮定する。
- ③ 赤外線カットオフ波長を設定し、発電エネルギーと積分発電エネルギーとの比を計算する。ここで発電エネルギーは可視光から赤外線カットオフ波長とし、積分発電エネルギー積分範囲は、可視光から $3\mu\text{m}$ とする。
- ④ 以上の計算をアモルファス、微結晶、結晶のシリコン太陽電池について行い、赤外線除去による効果を比較する。

2. 1 太陽光エネルギースペクトルの仮定

図 1 に太陽光エネルギースペクトルの様子を示す。今回の評価では大気圏外の太陽光スペクトル (AM-0) に替えて、6000K の黒体輻射を太陽光エネルギースペクトルに近似式として使用する。黒体輻射 $B(\lambda)$ は以下の式を用いた。

$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

ここで h 、 c 、 λ 、 k 、 T は、夫々、プランク定数、光速、波長、ボルツマン定数、黒体温度である。ただし、実際の太陽電池ではカバーガラスで紫外線を遮断するとし、 $0.4\mu\text{m}$ 以下は計算しない。図 2 に 6000K の黒体輻射スペクトルを示す。

2. 2 太陽電池感度の仮定

太陽電池の効率 η_s は、以下の式で定義される。

$$\eta_s = \frac{V_{op} I_{op}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.1)$$

V_{op} 、 I_{op} は、夫々最適負荷電圧、最適負荷電流である。

解析では、 V_{op} を一定とし、 I_{op} をセル内で光によって誘起される短絡電流と近似し、単位波長での分光特性はセル内に侵入した光子が電子を励起する効率である分光感度特性に比例するとできる。太陽電池効率 η_s には入射して反射する光子も含まれ分光感度は吸収光に対するものなので、単位波長での絶対値は分からないが、可視光から $3\mu\text{m}$ まで反射率はほぼ一定であるので、同一種の太陽電池で比較する場合は特に問題がないとした。図 2¹⁾ に各種シリコンの分光感度特性を示す。よって、太陽電池の分光感度を $R_s(\lambda)$ 、発電効率を $\eta(\lambda)$ として以下のように仮定する。

$$\eta(\lambda) \propto R_s(\lambda) \quad (2.2)$$

2. 3 分光発電量の算出

太陽電池の単位波長での発電量 $P(\lambda)$ を求める式を定める。まず、単位波長での発生電流量 $I(\lambda)$ は、入射太陽光エネルギースペクトルを黒体輻射 $B(\lambda)$ で、単位波長での発電効率 $R_s(\lambda)$ をセルの分光感度で近似すると次のようになる。

$$I(\lambda) \propto B(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda = B(\lambda) R_s(\lambda) d\lambda$$

よって、発電量 $P(\lambda)$ は、次のようになる。

$$P(\lambda) \propto I(\lambda)$$

$$= \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} R_s(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

となる。アモルファスシリコン、微結晶シリコンおよび結晶シリコンの $R_s(\lambda)$ は、図 3 の分光感度データから、図 4 (a) から (c) のように 3 次関数として光の波長を 0.4 から $1.1\mu\text{m}$ でフィッティングして得た。その関数形は夫々、

$$\begin{aligned} R_s(\lambda) &= 0.275\lambda^3 - 12.619\lambda^2 + 13.163\lambda - 2.586 && (\text{アモルファスシリコン}) \\ R_s(\lambda) &= 12.49\lambda^3 - 31.431\lambda^2 + 23.792\lambda - 4.744 && (\text{微結晶シリコン}) \\ R_s(\lambda) &= -5.073\lambda^3 + 7.806\lambda^2 - 3.652\lambda + 1.455 && (\text{結晶シリコン}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

である。ただし、アモルファスシリコンでは $0.83\mu\text{m}$ 以上の感度は 0、微結晶および結晶シリコンでは $1.13\mu\text{m}$ 以上の感度は 0 とする。

2. 4 赤外線カットオフ依存性の計算

赤外線遮断波長 λ_c での発電量 $P(\lambda_c)$ は、以下の (2.5) 式ようになる。

ここで上で述べたように、 λ_{UV} は $0.4\mu\text{m}$ に固定し、 $T=6000\text{K}$ として、発電量 $P(\lambda_c)$ を計

算する。計算の概念図を図5に示す。

$$P(\lambda_c) = \int_{\lambda_{uv}}^{\lambda_c} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} R_s(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

なお、ここでは可視光領域での減衰はないものとする。

以上の手順により、発電量および太陽光エネルギーの赤外線遮断波長依存性を計算した。また、発電エネルギーと太陽エネルギーとの比の赤外線遮断波長依存性も計算した。

3. 計算結果

その結果を図6(a)から(c)に示す。図6(a)から(c)では、 $400\mu\text{m}$ から $1.127\mu\text{m}$ までの発電量に規格化している。図で「黒体エネルギー」は太陽光エネルギーの、例えば(発電)a-Si:Hはアモルファスシリコンセルの発電量夫々の遮断周波数依存性を示す。また、例えば(発電)a-Si:H/黒体は、アモルファスシリコンセル発電量の太陽エネルギーに対する比を示す。

これらの結果によれば、可視光境界付近の遮断波長では、アモルファスシリコンセルで最も発電量の変化が大きく、微結晶シリコンセル、結晶シリコンセルの順に急峻ではなくなる。表1にまとめたように、より遮断波長 $0.78\mu\text{m}$ では吸収太陽光エネルギーは47%程度減少する。一方、結晶シリコンセルでは $1.24\mu\text{m}$ で発電量が飽和し、吸収太陽光エネルギーは18%程度減少する。このように、セルの種類によって、吸収太陽エネルギーの赤外線遮断依存性は異なる。

また、全波長における発電量は、図7や表2で見られるように、アモルファスシリコンセルが最も低い。表2から、相対的な発電量は、微結晶シリコンセル、結晶シリコンセルで夫々凡そ、1.2倍、1.5倍となる。参考までに、各セルの変換効率を表3に示す。

4. まとめ

表1にまとめたように、より遮断波長 $0.78\mu\text{m}$ では吸収太陽光エネルギーは47%程度減少する。一方、結晶シリコンセルでも $1.24\mu\text{m}$ で発電量が飽和し、吸収太陽光エネルギーは18%程度軽減化が期待できる。しかし、全波長における発電量は、アモルファスシリコンセルが最も低く、相対的な発電量は、微結晶シリコンセル、結晶シリコンセルで夫々凡そ、1.2倍、1.5倍となることに留意する必要がある。

よって、今後は、断熱フィルム等を用いた熱制御系の軽量化については、単位面積の発電量が最も多い結晶シリコンセルを用いる場合の20%の熱負荷軽減や、アモルファスシリコンの場合の50%程度の熱負荷軽減をトレードオフ対象として検討する必要がある。

また、MDS-1に使用されている、幾種かの薄膜セルを多層化したマルチジャンクションが長期間使用可能であれば、太陽光スペクトル全域での高効率化も熱制御系の負荷軽減に有効である。

断熱フィルタを設置する場合は、透過方向下流側には保温効果があるので、1次ミラー等

熱に比較的強い部分に設置するのがよい。また、赤外透過型フィルムにより、可視光のみを反射する鏡も一つの候補である。このような市販の断熱フィルムについては、今後、適切な断熱特性を有するものを具体的に調査する予定である。

補足 1. 断熱フィルムについて

現在市販されている断熱フィルムは、主に有機物の積層により、反射や透過の波長領域を選択している。可視光透過度は、高々80%であり、SSPS 用としては改善の必要がある。赤外線遮断率は数値的には不明であるので、今後高性能な断熱フィルムについて調査する予定である。図 A 1 に赤外線遮断の例を示す。

以上

参考文献

- 1) 小長井 編 ; 「薄膜太陽電池の基礎と応用」 pp.159、オーム社、2001

表 1. カットオフ波長 $0.78 \mu\text{m}$ での各シリコンセルのエネルギー吸収飽和率
および黒体エネルギー飽和率

波長 (μm)	a-Si:H (無名数)	$\mu\text{c-Si:H}$ (無名数)	c-Si (無名数)	黒体 (無名数)
0.7750	0.9960	0.9018	0.8280	0.5275

表 2. 各シリコンセルの相対発電量の遮断波長依存性

エネルギー (eV)	波長 (μm)	a-Si:H (任意単位)	$\mu\text{c-Si:H}$ (任意単位)	c-Si (任意単位)
1.10	1.127	1.000	1.296	1.748
1.20	1.033	1.000	1.292	1.720
1.30	0.954	1.000	1.278	1.649
1.40	0.886	1.000	1.241	1.551
1.50	0.827	1.000	1.186	1.429
1.60	0.775	1.000	1.114	1.318
1.70	0.729	1.000	1.065	1.240
1.80	0.689	1.000	1.032	1.191
1.90	0.653	1.000	1.010	1.163
2.00	0.620	1.000	0.986	1.141

*アモルファスシリコンセルを規準 (= 1) とした。

表 3. 各シリコンセルの変換効率

セル	a-Si:H	$\mu\text{c-Si:H}$	c-Si
変換効率 (%)	13	18	24

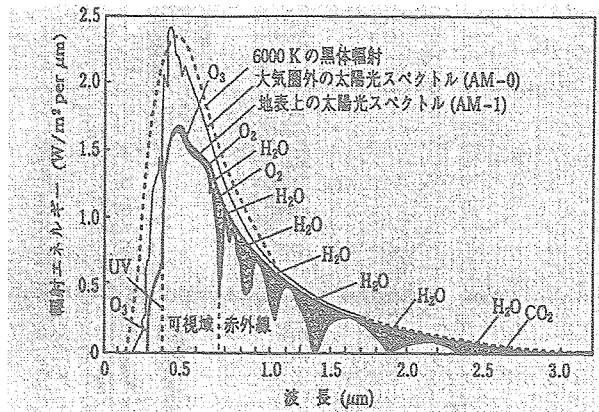


図 1. 太陽光スペクトル

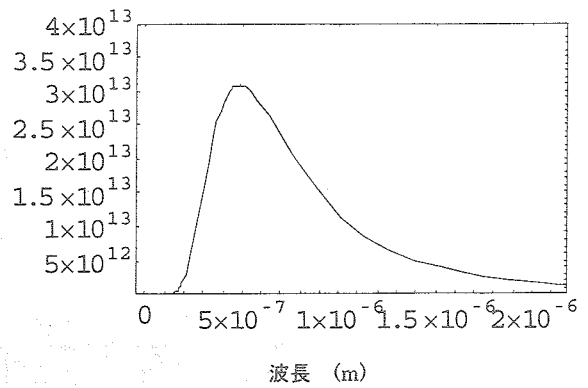


図 2. 黒体輻射スペクトル

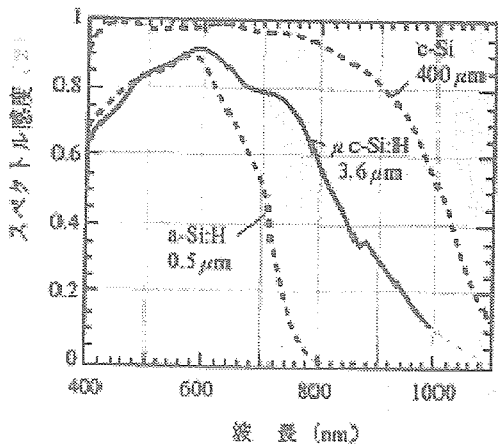


図 3. シリコン太陽電池の分光特性

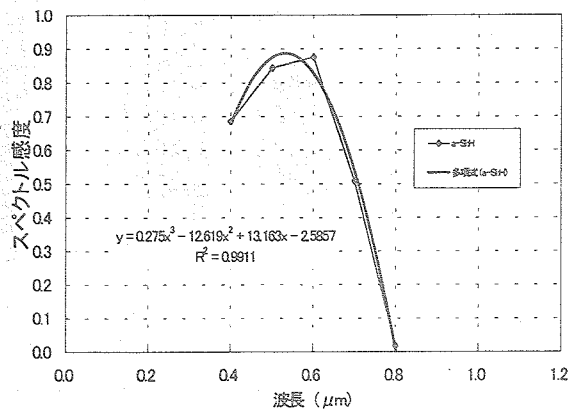


図 4(a). μc-Si:H 分光特性近似曲線

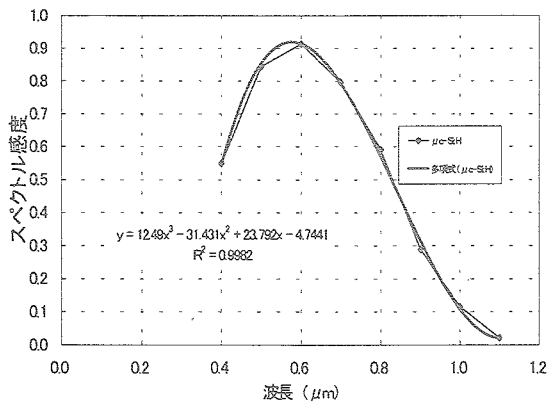


図 4(b). シリコンセル(μc-Si:H)分光特性近似曲線

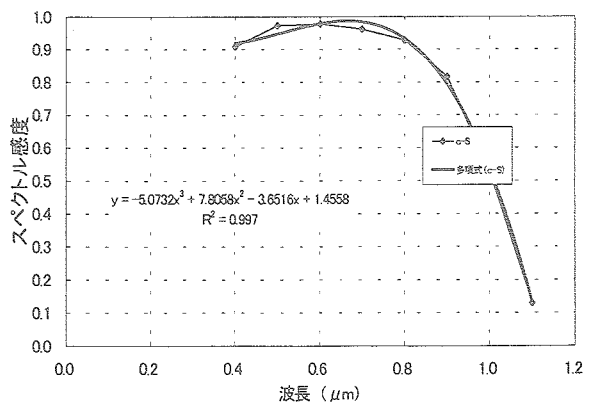


図 4(c). シリコンセル(c-Si)分光特性近似曲線

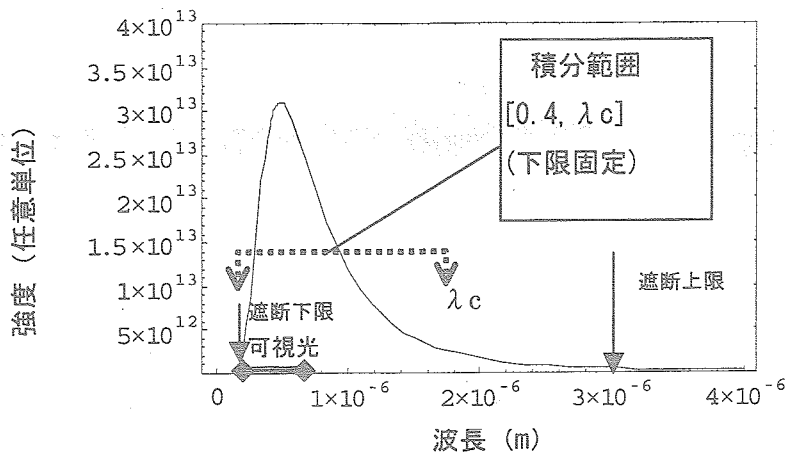


図5. 発電量計算概念図

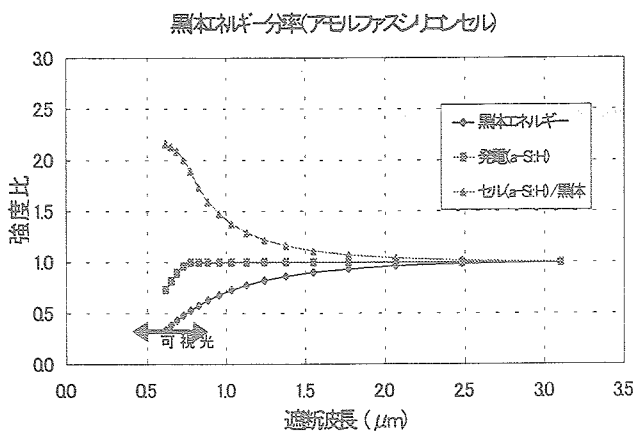


図6 (a). 発電量等の遮断周波数依存性

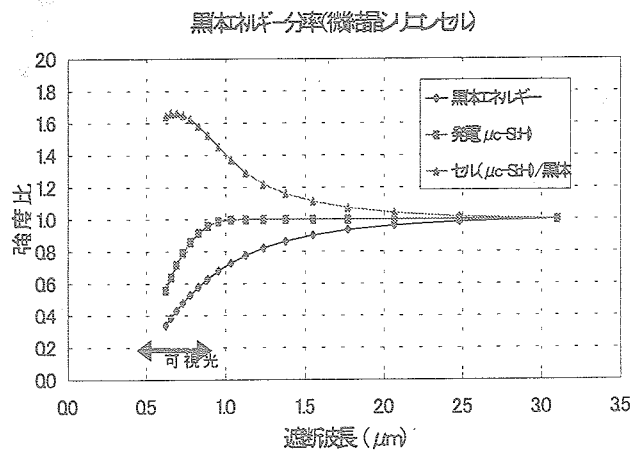


図6 (b). 発電量等の遮断周波数依

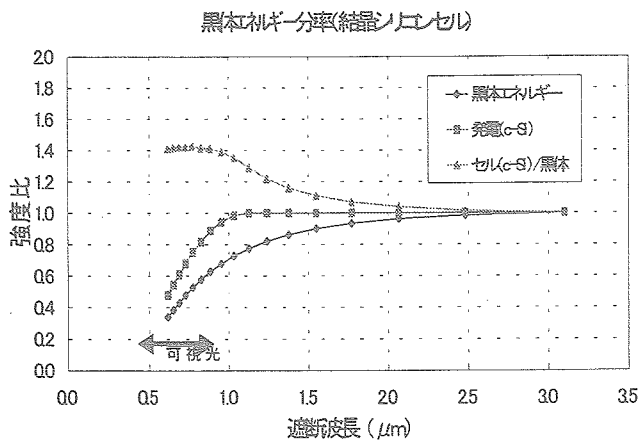


図6 (c). 発電量等の遮断周波数依

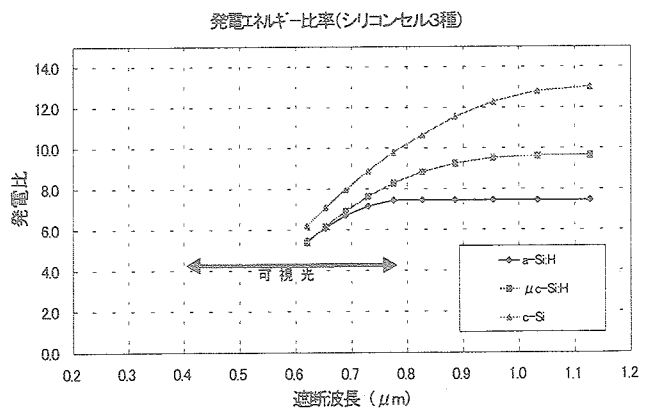


図7. 各セル発電量の遮断周波数依存性の比較 (相対値)

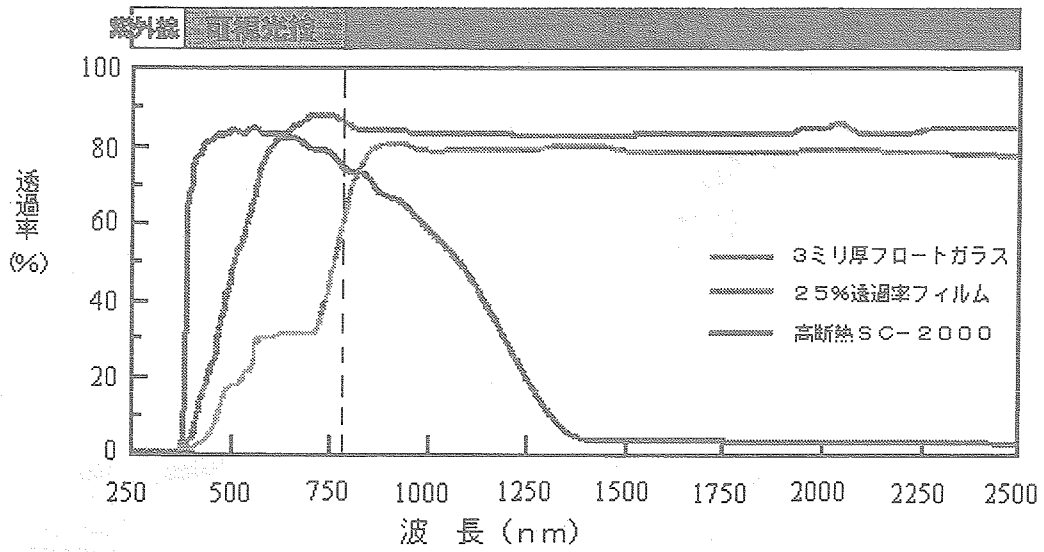


図 A 1. 断熱フィルムの波長透過率 (実物は不明)

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-006

発行日 2004年3月25日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1
TEL 0422-40-3000 (代表)
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・
東京都港区浜松町2-4-1

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

