

宇宙用太陽電池の現状と今後の展開

Present Situation and Perspective of Space Solar Cells

鈴木 皓夫*・佐賀 達男**・久松 正***

Akio Suzuki Tatsuo Saga Tadashi Hisamatsu

1. まえがき

近年、我国の宇宙開発に関しては、静止衛星を用いた各種情報サービスから移動体衛星通信、民間衛星放送のスタート、ハイビジョン・テレビの試験放送、大型地球観測衛星や磁気圏探査衛星の打ち上げ計画、無人宇宙実験室や宇宙ステーションの計画、ジャーナリスト宇宙飛行士の誕生等まで華やかな話題に事欠かない。しかし一方では、米国のスーパー301条項の適用をめぐる我国の商業衛星の国際市場への開放問題に続き、湾岸戦争を契機に我国の国際社会への貢献度が問われつつある状況下で、せめて文化面・技術面での国際社会への貢献とも言われる宇宙開発について、政府はもっと予算をつけるべきだとする声も高まり、まさに混沌とした状況になりつつあると言える。エネルギー・資源の観点から宇宙利用を見た場合、例えばLANDSAT(資源探査衛星)による宇宙からの植生、水資源、鉱物資源等の探査などがよく知られている。しかし、ここでは今年度から通産省が調査検討を開始する太陽光発電衛星(SPS; Solar Power Sattellite)技術に注目したい。これは赤道上空36000kmの軌道上に巨大な太陽電池パネルを設置し、太陽光で発電したエネルギーをマイクロ波に変換して地上に送電しようという壮大な構想である。これについては宇宙用太陽電池の今後の展開として、本報告の最後で改めて紹介する。

ところでシャープ株式会社は宇宙開発事業団から認定された宇宙用太陽電池のメーカーとして、昭和51年に打ち上げられた電離層観測衛星ISS「うめ」以来、国内外の衛星に多くの搭載実績を有している。現在最も信頼性に富み、かつ搭載実績も高い宇宙用太陽電池は単結晶シリコンを材料とした太陽電池であり、本報

告ではまず太陽電池の動作原理を簡単に紹介した後、この単結晶シリコン太陽電池を中心に宇宙用太陽電池の現状を述べる。続いて現在開発が進められている各種宇宙用太陽電池の特徴について紹介し、最後に上記の太陽光発電衛星についてその概要を述べる。

2. 現在の宇宙用太陽電池

2.1 太陽電池の歴史

太陽電池開発の歴史は古く、1839年にベクエレルが電解質溶液中の電極に光が当たると起電力が発生することを発見したことにまでさかのぼる事が出来る¹⁾。約40年後の1877年、アダムスとデイがSe(セレンウム)で同様の効果を見出し²⁾、1914年にはSeとCuO(酸化銅)の組み合わせで1%の変換効率を得ている。現在の太陽電池は1954年の、チャピン、フラウ、ピアソンの三人がSi(シリコン)PN接合太陽電池で6%の変換効率を得たことに端を発するが³⁾、このSi太陽電池の開発を通じて、現在の半導体産業の基礎技術の多くが培われて来た。また同1954年には最初の薄膜太陽電池であるCu₂S(硫化銅)-CdS(硫化カドミウム)太陽電池で6%の変換効率を得られたことがレイノルズらによって報告されている⁴⁾。太陽電池はその後1970年代の2度の石油危機を契機に石油代替エネルギー源として、また無公害なクリーン・エネルギー源として注目され、最近では1986年のチェリノブイリ原子力発電所の事故の教訓がこれを加速し、地球環境問題解決の有力な手段のひとつとして、太陽光発電の普及が強力に進められようとしていることはよく知られている。

宇宙用電源としての太陽電池は、1958年に打ち上げられた米国のバンガード1号以来、一部の特殊用途の衛星を除いて広く用いられている。その後の宇宙用太陽電池の歴史は衛星の長寿命、大電力化に伴った高効率化、軽量化、耐放射線性強化の歴史と言えよう。

* シャープ(株)電子部品事業本部太陽電池事業部事業部長
** " " 技術部主査
*** " " 主任

〒639-21 奈良県北葛城郡新庄町薑282番1

2.2 太陽電池の動作原理

太陽電池は光のエネルギーを直接電気エネルギーに変換する素子であり、電気エネルギーを蓄積する機能は有していない。その基本的な構造は半導体PN接合である⁵⁾。その一例として図-1にN on P型太陽電池の動作原理を示す。P型半導体基板のごく表面に薄いN型領域が形成されている。図中の矢印の方向から光が入射すると、そのエネルギーが吸収されて半導体内に電子-正孔対が発生する。電子はPN接合を越えてN型領域へ、正孔はP型領域へ到達することで外部回路に電流が流れる。外部回路を開放した場合にP側端子-N側端子間で発生する電圧を開放電圧、外部回路

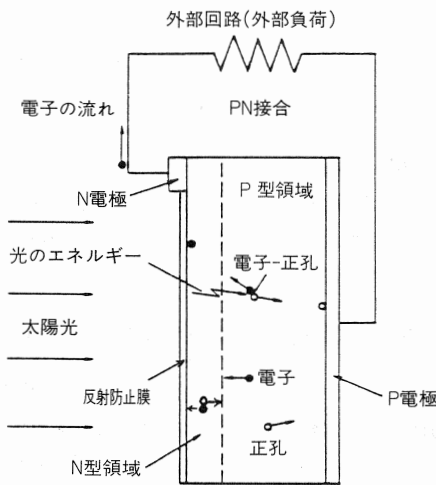


図-1 太陽電池の動作原理

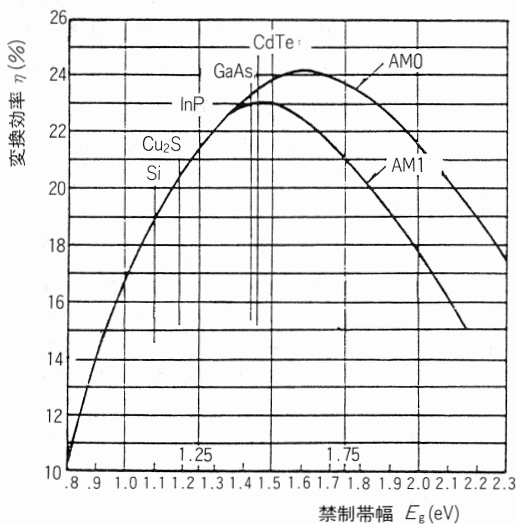


図-2 半導体の禁制帯幅と太陽電池の変換効率の関係

を短絡した時に流れる電流を短絡電流と言う。外部回路に適当な負荷抵抗を接続することによって、電力を取り出すことが出来る。この時の(最大出力;取り出すことが出来る最大電気エネルギー)÷(開放電圧×短絡電流)を曲線因子、(最大出力)÷(入力;入射した光エネルギー)を太陽電池の変換効率と呼ぶ。変換効率は太陽電池材料や構造、入射光の条件等によって異なる。図-2は入射光のスペクトル分布と太陽電池材料としての半導体の基礎的な物性定数である禁制帯幅との整合性について着目し、太陽電池が理想的な状態で電流-電圧特性を有すると仮定した場合の禁制帯幅と太陽電池の変換効率の関係調べた計算結果である⁶⁾。図中のAMとは、Air Massの略で入射直達光が通過した大気中の路程の長さを示す。AM1は赤道上、海拔ゼロの南中時の垂直日射にあたり、AM0は大気圏外での垂直日射にあたる。同図よりいずれの場合においても禁制帯幅が1.4~1.7eV付近の半導体材料が効率を得るという観点からは望ましいといえる。次項で紹介する現在開発が進められている太陽電池材料が選ばれてきた根拠のひとつはここにある。禁制帯幅が1.4~1.7eVの半導体材料としては、例えばCdTe(カドミウム・テルライド)やGaAs(ガリウム・ヒ素)などがあげられる。

しかし現実問題としてこれからのSiと比較すると結晶成長技術やプロセス技術がまだまだ未熟であり、物性自身にも不明な点が多い。さらに材料価格や大規模な太陽光発電を想定した場合の資源的制約や、生産過程から使用後の廃棄までの間の無公害性の確保等を加味すると、まだSiを総合的に凌駕する太陽電池材料は見出されていない、という方が妥当であろう。ところで近年各種太陽電池は特にその構造的な面で長足の進歩をとげ、いまや図-2の縦軸の値を塗り変えつつある。例えばグリーンらは地上用のSi太陽電池で24.2%もの変換効率を得たことを報告していることを付け加えておく⁷⁾。

2.3 宇宙用太陽電池

宇宙用太陽電池に特に求められている点は高出力であること、放射性劣化が小さいこと、軽量であること、信頼性が高いこと等である。高出力であることと放射性劣化が小さいことは、太陽電池の材料面、構造面で相反する要請である場合が多い。軽量であることについては、例えば現在宇宙開発事業団で開発が進められているH-2ロケットで打ち上げ価格の目標が800万円/kgといわれており⁸⁾、軽量であることのメリットは

表1 現在実用レベルにある各種宇宙用太陽電池の諸特製

セル	タイプ	サイズ	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF(%)	P_{max} (mW)	η_{pr} (%)	備考
Si	50 μ mBSFR	2 \times 2 cm^2	605	160	79.0	76.5	14.1	AMO, 28°C カバーガラスなし
		2 \times 4 cm^2	605	320	79.0	153.0	14.1	
		4 \times 6 cm^2	605	970	78.2	459.0	14.1	
	100 μ mBSFR	2 \times 2 cm^2	605	166	79.2	79.5	14.7	
		2 \times 4 cm^2	605	326	80.6	159.0	14.7	
		4 \times 6 cm^2	605	990	79.6	477.0	14.7	
	200 μ mBSR (10 $\Omega \cdot cm$)	2 \times 2 cm^2	545	160	78.4	68.4	12.6	
		2 \times 4 cm^2	545	320	78.4	136.8	12.6	
		4 \times 6 cm^2	545	960	78.4	410.4	12.6	
GaAs (AlGaAs -GaAs)	200 μ m	2 \times 2 cm^2	977	125	77.8	95.0	17.5	AMO, 28°C カバーガラスなし
		2 \times 4 cm^2	977	250	77.8	190.0	17.5	
InP	400 μ m (n ⁺ -p)	1 \times 2 cm^2	828	63.7	83.7	44.1	16.3	AMO, 20°C カバーガラスつき

V_{oc} : 開放電圧 I_{sc} : 短絡電流 FF: 曲線因子 P_{max} : 最大出力 η_{pr} : 素子占有面積に対する変換効率

はかり知れないものがある。信頼性については、宇宙用太陽電池は宇宙という修理困難で苛酷な条件下で使用されるため、その信頼性上の要請は大変厳しいものがあるのは言うまでもない。現在実用レベルにある宇宙太陽電池の諸特性を表1に示す。Si太陽電池については用途に応じて厚さ、寸法及びタイプが使い分けられており、ここでは代表的なもののみ示した。軽量化を図るために太陽電池厚さが50 μ mの超薄型太陽電池が実用化されている⁹⁾。

GaAs太陽電池はSi太陽電池に比べて高効率であること、放射劣化が小さいこと等のいくつかの特長を有している^{10,11)}。国内では昭和63年に打ち上げられた通信衛星CS-IIIに搭載実績がある。

InP太陽電池はGaAs太陽電池よりもさらに放射線劣化が小さいことに特長がある¹²⁾。平成2年に打ち上げられた科学衛星MUSES-Aの子衛星ルナ・オービ

ターに用いられた¹²⁾。

GaAs太陽電池、InP太陽電池は次項で述べるようにSi太陽電池に比べて重量や価格の点に問題があり、これらの改善が今後の技術開発の課題である。

3. 開発が進められている宇宙用太陽電池

単位重量あたりの出力を高めるために、太陽電池や構造体の研究開発が各国の研究機関で進められている。例えば米国のNASAでは平面型のアレーで130W/kg、さらに将来的には300W/kgを目標に開発が進められている¹⁴⁾。表2に現在開発が進められている主たる宇宙用太陽電池をまとめて示した。一部を除いてまだ実験室レベルにあり、現状では価格面で実現が困難と思われるものや、微小面積でしか評価されていないものも含まれている。直接的な比較は難しいので、ここでは報告されている交換効率のみ示した。詳しくは、個々

表2 現在開発中の主たる宇宙用太陽電池

セル	構造、タイプ、サイズ等	効率(%)	備考	文献
薄型 Si	50 η m BSFR型 4 \times 6 cm^2	14.3	AMO, 28°Cカバーガラスなし	29)
GaAs	MOCVD成長 0.25 cm^2	21.7	AMO, 25°Cカバーガラスなし	30)
GaAs/Ge	Ge基板; 100~300 μ m, MOCVD成長, 2 \times 2 cm^2	20.5	AMO, 28°C	16)
GaAs/Si	Si基板; 150 μ m, MOCVD成長, 2 \times 2 cm^2	18.3	AMO, 28°Cカバーガラスなし	19)
CLEFT GaAs	4 cm^2	20.6	AMO, 28°C	31)
InP	MOCVD成長, 4 cm^2	19.1	AMO, 25°C	32)
InP/Si	MOCVD成長 GaAs中間層	7.1	AMO	23)
CIS	ZnO/CdS/CIS/Mo/ガラス基板	10.89		33)
アモルファスSi	カプトン・フィルム上	5.5	AMO	26)

の文献を参照頂きたい。

これらの中で最も成熟しているのは薄型Si太陽電池とGaAs（単結晶）太陽電池である。GaAs太陽電池はSi太陽電池に比べて効率がよく、また高温時の出力低下も小さいので、特定の宇宙環境下における単位面積あたりの発電量ではSi太陽電池にまさる。しかしアレーの軽量化を考慮すると評価は逆転する。すなわちCaAsの比重はSiの比重の約2.3倍あり、さらにGaAs単結晶はわれやすく容易に薄型化出来ない（現在200 μ m以下の太陽電池は実用化されていない）ばかりか、太陽電池を乗せる構造体もより剛直なものが要求されるためである。また、現状GaAs単結晶ウエーハの価格はSiの数倍以上し、太陽電池の価格が高くなるという問題点を有している。

GaAs/Ge, GaAs/Si, CLEFT GaAsはGaAs太陽電池の特長を生かしつつ、その重量や価格面での欠点の改善を意図した太陽電池である。GaAs/Geは、GaAsを比較的結晶成長が容易なGe（ゲルマニウム）基板上に成長させてGaAs太陽電池を製作する試みである^{15),16)}。近年、米国の2社のメーカーが製造販売を開始した、と言われている。しかし、Geの比重はGaAsの比重とほぼ等しく、基板を薄くできる分しか軽量化をはかれない。GaAs/Siは安価で軽量なSi基板上にGaAsを直接成長させてGaAs太陽電池を製作する試みである^{17),18)}。従来GaAsとSiは格子定数や熱膨張係数に差があり、GaAsのSi基板上への直接成長は不可能とされてきたが、近年のMOCVD（有機金属を用いた気相成長）法の進歩によって、太陽電

池として使用可能な程度の品質のGaAs薄膜の成長が可能になりつつある¹⁹⁾。しかし、成長法が複雑であり、量産化、低価格化に課題を有している。

CLEFT GaAsは気相成長で形成したGaAs薄膜太陽電池をCLEFTプロセスと称される独自の方法で剥ぎ取り、他の基板上に貼り付ける方法である²⁰⁾。近年、下記のCIS太陽電池と重ねたタンデム型太陽電池が話題となっているが、太陽電池の大面积化や適切な両太陽電池間の接続等に疑問が残る³¹⁾。

InP太陽電池についても比重がGaAsの約15%小さいだけでGaAs太陽電池と同様の問題点を有している。InP単結晶ウエーハの価格はGaAsの数倍し、価格の面での問題はGaAs太陽電池以上に大きい。InP/SiはGaAsと同様、安価で軽量なSi基板上にInPを直接成長させInP太陽電池を製作する試みであるが^{21),22)}、InPとSiの格子ミスマッチはGaAs以上あり高品質の結晶成長はまだ実現されていない²³⁾。

CISと略記されるCuInSe₂は三元化合物の薄膜太陽電池である。小面積で効率もまだ低いが耐放射線性にすぐれていることが報告されている²⁴⁾。現在は厚いガラス基板上に形成されているが50 μ m以下のガラス基板上やフレキシブルな基板上に形成が可能になると今後の重要な候補になりうる可能性をもつ。

アモルファス・シリコン太陽電池は単位重量あたりの出力が著しく大きいという点から興味を持たれ、基礎データが取得されつつある²⁵⁾。薄いカプトン・フィルム上にロール・ツー・ロール式に量産することが考えられている²⁶⁾。しかし効率が低いことと、光を当て

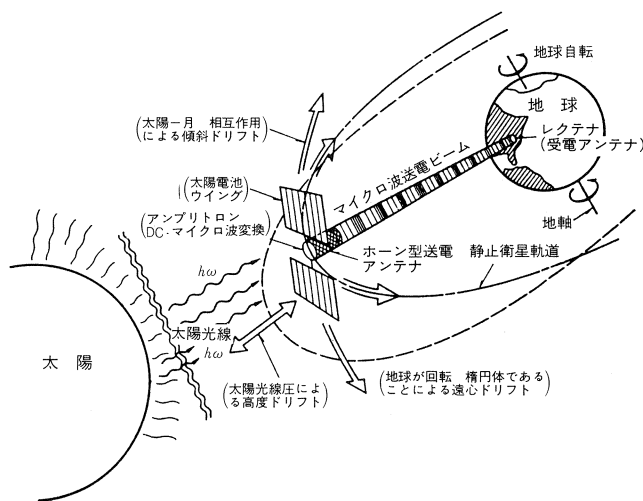


図-3 太陽光発電システム

続けると出力が劣化する現象（スティーブラー・ロンスキー効果）のあることが問題点である。

宇宙用太陽電池は今後ますます高効率化、大面積化、軽量化、耐放射線性の向上、低価格化が要求されるものと思われる。以上見て来たようにこれらの要求にこたえ得る材料は、現段階では単結晶Siである。近未来も引き続き単結晶Siが宇宙用太陽電池の主流を占め、GaAs, InP等の薄膜太陽電池がそれを補完する形で一部の特殊用途の衛星に使用されていくものと予想される。

4. 太陽光発電衛星

宇宙発電の計画は1968年に米国のピーター・グレイサーによって提案された「効率的で安全なマイクロ波ビームによる電力伝送、宇宙空間における電力プラント」の概念に基づいて米国で1970年代に議論され、1977年度から4年間にわたって概念設計が行われたものである²⁷⁾。(一部にこれらのアイデアはソ連の科学者-1929年ワレンチン・ゲルシコ, 1948年ゲオルギ・ババト, 1960年ニコライ・ワルバロフらによって提案されていたとする説もある²⁸⁾。)この計画はその後のレーガン政権の財政緊縮方針や石油価格の急落によって中断されてしまった。しかし近年スリーマイル、チェルノブイリ原発事故を契機に、研究の再開を求める動きが見られている。今年度から進められる通産省の計画は米国のこのSPSのいわば日本版にあたるものであり、同省では研究開始の動機について「宇宙発電は2020年以降の長期的視野に立ったものであり、中東情勢の不安定さや環境問題を考えると新エネルギー開発は日本にとって急務である」と説明している。

太陽光発電衛星とは赤道上空36000kmの軌道上に巨大な太陽電池や集熱用パネルを設置し、太陽光、太陽熱で発電して、これをマイクロ波に変換して地上に送電する衛星である。図-3に太陽光発電システムの概念図を示す。季節、天候、昼夜の別によらず太陽エネルギーを充分利用出来、16km²の受光面を持つ太陽光発電衛星一基で、大型原子力発電所5基分にあたる500万kwの発電が可能といわれている。各種発電方法についてエネルギー比:(発生エネルギー) / (建設に要するエネルギー+運転に要するエネルギー)を比較すると石炭火力発電0.31、軽水炉原子力発電0.24、SPS2.1とされており燃焼を要しないSPSは断然優位と言われている。新エネルギーの開発を進めているサンシャイン計画に沿って、今年度から産学共同

の本格的な研究を始める予定で、既に事前検討会も開催されている。そこでは今後の検討項目として、静止軌道上の衛星相互干渉、地上通信システム相互干渉、地上生態系や人体への影響、SPS設備作業者への影響等が挙げられている。エネルギー問題解決のための、太陽電池を使った宇宙からの有力な回答として、我々も熱意を込めてこれを注視し、協力していきたいと考えている。

5. おわりに

以上、宇宙用太陽電池の現状と現在開発が進められている太陽電池及びそれを応用した太陽光発電衛星の話題等を紹介した。いまや宇宙空間利用は、多方面にわたって大きく展開しようとしている。今後は単に太陽電池のみにとどまらず、構造体等システム面、企画面との連携もますます強化する必要があり、例えば太陽光発電衛星を目標の一つとして、総力をあげて開発に取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) Becquerel, E., Comptes Rendus, 9, July 30, 1839, p114.
- 2) Adams. W.G. & R.E. Day., Proc. of the Royal Society, A25, 1877, p. 113.
- 3) Chapin, D.M. et al., J. Appl. Phys., 25, 3, May 1954, p. 676.
- 4) Reynolds, D.C. et al., Phys. Rev., 96, 2, Oct. 15, 1954, p. 533.
- 5) 「太陽光発電」高橋 清, 浜川圭弘, 後川昭雄著, 森北出版(株)
- 6) Loferski, J.J., J. Appl. Phys., 27, 7, July 1956, p. 177.
- 7) M.A. Green, S.R. Wenham, J. Zolper and A.W. Blakers, 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990) p. 207.
- 8) 朝日新聞 1985年2月21日付
- 9) H. Ueyama, T. Matsutani, T. Saga, T. Hirano, Y. Kiyota, A. Suzuki and S. Matsuda, Technical Digest of the International PVSEC-1, p. 825, Kobe, Japan, 1984
- 10) H.J. Hovel and J.M. Woodall, J. Electrochem. Soc. vol 120, No. 9 1246
- 11) R. Loo et al., 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1985), p. 562
- 12) A. Yamamoto, M. Yamaguchi, and C. Uemura, Extended Abstracts, 164th Electrochemical Society Meeting, Washington, D.C., p.467 (1983).
- 13) T. Takamoto et al., Technical Digest of the International PVSEC- 5, p. 547, Kyoto, Japan. 1990
- 14) D. J. Flood and M. Piszczor, Jr., Proceedings of the European Space Power Conference held in Madrid, Spain, 2 - 6 October, 1989 (ESA SP-294, August 1989)
- 15) 清水正文他, 1985年春季第32回応用物理学関係連合講演会予稿集, 1 a-x-7

- 16) P.A. Iles, Y.C.M. Yen, F.H. Ho, C.L. Chu and C. Cheng IEEE Electron Device Lett., vol. 11, No. 4, April, 1990.
- 17) 清水正文, 水木敏雄, 久松 正, 山口利幸, 江夏昌郎, 菅原和士, 桜井 武: 信学技報 (ED85-92)85 (No.214) (1985)p. 23
- 18) M. Akiyama, Extended Abstracts of the 18th (1986 International) Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, 1986, p113
- 19) Y. Ohmachi, T.Ohara, and Y. Kadota, 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990), p.89.
- 20) R.W. McClelland, C.O. Bozler, and J.C.C. Fan, Appl. Phys. Lett., 37, 560, (1980)
- 21) 山本島勇, 内田直人, 山口真史: 日本結晶成長学会誌, VOL. 13, No. 4, (1986)p. 267.
- 22) A. Seki, F. Konushi, J. Kudo, S. Kakimoto, T. Fukushima and M. Koba, Jpn. J. Appl Phys. 26. (1987) L1587
- 23) L. Weinberg, C.K. Swartz and D.J. Brinker, Technical Digest of the International PVSEC-5, p. 81, Kyoto, Japan, 1990
- 24) R.M. Burgess et al., 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1988), p. 909
- 25) M.Katayama, H.Morimoto, and K. Sugawara, phys. stat. soi. (a) 78, K 5, (1983)
- 26) Final Report, NASA Contract (NAS3-25825), 1990.
- 27) 例えば P.E. Glaser, Science. vol. 162, No. 3856 (Nov. 1968).
- 28) レオニード・レスコフ, イリヤ・ベレジン: 燃料及燃焼 第52巻第6号, p. 396
- 29) T. Saga et al., (to be published)
- 30) S. P. Tobin et al., 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990). p. 158
- 31) R.P. Gale et al., 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990), p. 53
- 32) C.J. Keavney et al., 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990), p. 141
- 33) Bulent M. Basol et al., 21th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1990), p. 546

他団体ニュース

「地球環境問題への技術による対応」

—21世紀へ向けたエネルギー・地球環境産業技術開発における国際協調—
開催について

- | | |
|---|---|
| <p>1. 主 催 国際エネルギー機関 (IEA)
通商産業省 (MITI)
新エネルギー・産業技術
総合開発機構 (NEDO)
(協)地球環境産業技術研究機構
(RITE)</p> | <p>4. ワークショップの構成</p> <p>A. 省エネルギー技術</p> <p>B. 次世代化石燃料技術</p> <p>C. 新・再生エネルギー技術</p> <p>D. 先進的原子力技術</p> <p>E. 革新的地球環境技術</p> <p>F. その他将来のエネルギー技術とシナリオ</p> |
| <p>2. 日 時 平成3年11月6日(水)～8日(金)</p> | |
| <p>3. 開催場所 国立京都国際会館
(京都市左京区宝ヶ池)</p> | |

事務局 財団法人 地球環境産業技術研究機構 企画調査部企画課 (担当: 田中, 宮坂)

〒600 京都市下京区塩小路通鳥丸西入 新京都センタービル4F

TEL 075-361-3611 FAX 075-361-5607