

特集

太陽電池実用化の取り組み

セル高効率化技術の開発動向

①結晶系シリコンセル

Crystalline Silicon Solar Cells

齊 藤 忠*

Tadashi Saitoh

- セル設計シミュレータの開発
- 新プロセス技術の開発

1. はじめに

最近10年間の太陽電池市場は着実に増大し、1983年の世界市場は約20MWpであったが、昨年度は58MWpと約3倍に達している。その内訳は、1983年の結晶シリコン型が全生産量の約50%であったが1992年度は約70%と結晶シリコン型の割合が著しく増えている。その原因は過去においてアモルファスシリコン型が民生用に大量生産されたが飽和し、その後の増加は主として電力用であったため結晶シリコンが主に使用されたためである。屋外用では、変換効率、信頼性および安全性などが要求され、現状では結晶シリコン系が唯一の太陽電池である。資源の豊富さや製造技術の確実性などを考慮すると、大規模になればなるほど結晶シリコン系の重要性が増し今後も主要な地位をしめると思われる。結晶シリコン系には、単結晶型と多結晶型があり最近多結晶型が増えているが、長期的には同じように伸びていくと考えられる。

発電用太陽電池の研究開発に要求される要素として、

- 高効率（モジュールで20%）
- 高信頼性（寿命20年）
- 低コスト（200円/Wp）

があるが、特に「高効率化」について研究開発が推進されてきた。これは、近い将来実現可能と考えられている離島の補助電源や最終目標である個人住宅用を想定しても、モジュール効率が10%足らずでは光発電システムの経済性は成り立たないと言われているからである。結晶型シリコン太陽電池モジュールの変換効率は、実験室レベルでは効率20%（生産レベルで約13%）になった。これらのモジュール効率向上はセル効率の向上とモジュール内のセル充填効率の改善により実現されている。特に、セル効率の向上は、

- 結晶品質の向上と評価技術の開発

によってもたらされた。豪州New South Wales大学のM. Greenらが長年の念願であったセル効率20%の壁を破って以来、日本でも20%台の効率が得られている。93年5月の米国のIEEE太陽光発電会議で、これらの高効率化技術を用い効率20%のモジュールが試作されたとの発表があった。本年から、低コストを考慮した実用化を図る研究開発が通産省ニューサンシャイン計画のプロジェクトとして開始された。

ここでは、まず結晶シリコン系太陽電池の変換効率の年次推移とその主要技術について述べ、理論的変換効率および最近の太陽電池セルの研究開発状況について紹介する。

2. 変換効率の年次推移

結晶シリコン系太陽電池の最初の論文は1954年にベル電話研究所のChapinらにより発表され、以来初期においては人工衛星用、石油危機以来は地上発電用として研究開発が推進されてきた。その間の研究室レベルでの変換効率の推移を図-1に示す。当時のセルはn型基板を用いp型の拡散を行って製作され、その効率は約6%であった。その効率は着実に増加し約15%で飽和しその傾向は1980年当初まで続いていた。その後、

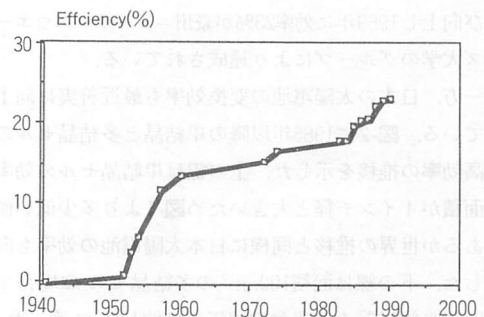


図-1 結晶シリコン太陽電池の変換効率の年次推移

*東京農工大学工学部電子情報工学科教授
〒184 小金井市中町2-24-16

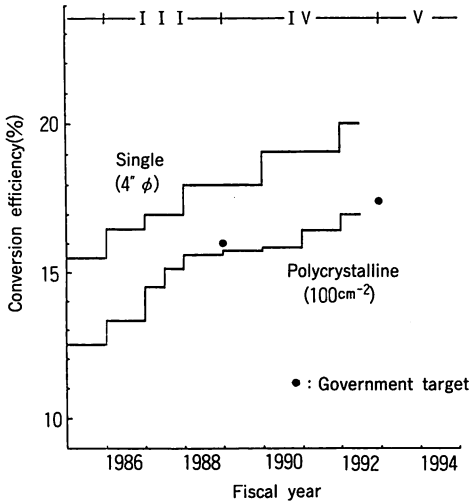


図-2 日本で開発された結晶系Si太陽電池の変換効率の年次推移

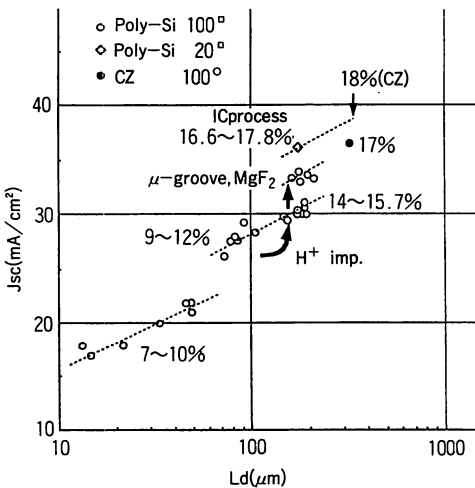


図-3 過去9年間で多結晶太陽電池の短絡電流密度と少数キャリア拡散長の関係

再び向上し1989年に効率23%が豪州ニューサウスウェールズ大学のグループにより達成されている。

一方、日本の太陽電池の変換効率も最近着実に向上している。図-2に1985年以降の単結晶と多結晶セルの最高効率の推移を示した。上の線は単結晶セルの効率で面積が4インチ径と大きいため図-1より多少低い値であるが世界の推移と同様に日本太陽電池の効率も向上した。下の線は面積100cm²の多結晶セルの場合で1985年の約12%の効率が1992年には約17%に達した。この値は世界最高であり、この高い効率は基板メーカー

とセルメーカー間の綿密な協力体制により実現された。技術的には図-3に示したように各種の技術により効率改善がなされた。まず第一に結晶の品質を表す少数キャリア拡散長で当初100μm以下であり効率は7~10%であった。結晶固化時の温度制御の実験的改善により少数キャリア拡散長は100μm以上となり30mA/cm²近い短絡電流が得られ効率も12%台になった。その後イオン打ち込み技術やプラズマ技術による結晶への水素導入による欠陥パッシベーションおよび微細グループの形成や反射防止膜および微細電極形成技術の改善により17%の効率が達成された。有効であったセル製作技術を挙げると次のようになる。

- (1) グループ技術による表面光反射率の低減
- (2) 2層反射防止膜の被着
- (3) りん拡散条件の最適化
- (4) Al合金化による背面電界形成の最適化
- (5) 微細Ag印刷電極形成技術の改善
- (6) 粒界内などの欠陥の水素パッシベーション

現在の高効率多結晶セルの少数キャリア寿命は150~200μmと推測され基板の厚さに近づいている。今後さらに効率向上を図るには、さらに少数キャリア寿命の向上を図ることが必要であるが、時間がかかりそうである。

3. 変換効率の予測

接合を有する半導体に光が当たると内部にキャリアが発生し、pn接合の逆方向に直流の定電源を持つことになる。変換効率は次式で表される。

$$\text{エネルギー変換効率 } \eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{\text{入射太陽光強度 (W)}}$$

I_{sc} = 太陽光下の短絡電流、半導体の物性値 (禁帯幅, キャリア寿命, 吸収係数など), 形状 (厚さ, 表面反射率など)

V_{oc} = 太陽光下の開放電圧, ダイオード因子 (n と J_0), J_{sc} など。

FF = 太陽光下の曲線因子, 接合特性, 電極 (パターン, 抵抗など)

太陽光強度 = 100mW/cm², AM1.5, 全天日射
AM : air mass = 1/cosθ

結晶シリコン型太陽電池の理論効率に影響する因子は、次の2項目に大別される。

- Si結晶の物性 : 厚さ, 欠陥, 比抵抗, ドーパント, ドーピングプロファイル, 少数キャリア寿命, 表面物性, など。

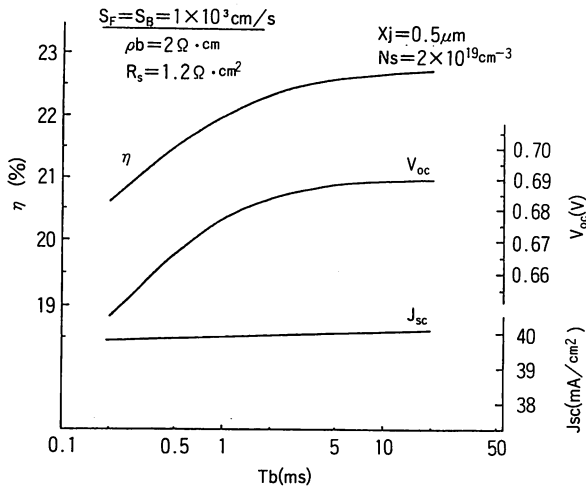


図-4 1次元シミュレータで計算した変換効率と少数キャリア寿命の関係

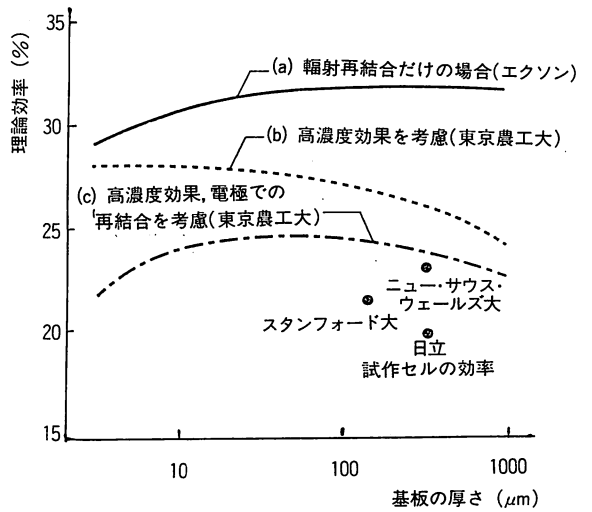


図-5 結晶Si太陽電池の理論的変換効率とこれまでの到達効率

- セル構造：接合形成，ドーピングプロファイル，表面物性，表面パッシベーション，反射防止膜，電極，など

このセル構造に光を照射した時，n層に正孔が，p層に電子の少数キャリアが生成される。それらの少数キャリアの挙動は，ポアソン方程式とキャリアの連続方程式で記述される。太陽電池での光吸収による電子-正孔対の生成速度は入射する疑似太陽光スペクトルと吸収係数を用いて計算される。太陽電池の効率を左右する最も重要な因子は，少数キャリア寿命である。少数キャリア寿命を規定する因子として，多数キャリア濃度と結晶欠陥がある。p型ベース層の少数キャリア寿命は，多数キャリア濃度 $10^{14} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ では約1msで， 10^{16} cm^{-3} を越えるとオージェ再結合のため少数キャリア寿命が急激に低下する。高濃度ドーパの半導体の物性については，過去多くの研究がなされているが，現在でも完全には解決されていない。特に，高濃度で禁制帯幅が狭くなる現象が生ずる。この現象は，真性キャリア濃度の増大，ひいては開放電圧に関係する飽和電流の増大を持たらす。表面再結合速度は，表面パッシベーションに関係し，今後の効率向上にとって極めて重要な因子である。太陽電池の表面パッシベーションでは，高濃度n⁺層表面の酸化を行うが，理論的には高濃度のため表面再結合速度が増加すると予想されている。Snellが行った界面準位密度とキャリア濃度に関する研究によると，濃度増加による界面準位

密度の増加は約1桁であり大きくなく酸化によるパッシベーション効果が期待できると考えられる。また，最近水素アニールが表面再結合速度の低減に有効で開放電圧を向上させると報告されている。

コンピュータを用いた数値解析シミュレータの開発は最初Sandiaの国立研究所のFossumにより行われた。その後，Purdue大学やIowa州立大学で，一次元と二次元の太陽電池特性解析プログラム(SCAP1D, SCAP2D, PC-1D)が開発された。最近，国内でも，パーソナルコンピュータを用いる一次元数値解析プログラムが開発され，二次元シミュレータの開発も行われている。

最近，我々が一次元シミュレータ(PC-1D)を用いて計算した理論変換効率の一例を図-4に示す。この図は，変換効率と少数キャリア寿命の関係を示している。この図から，高効率化のためには抵抗率 $2 \Omega \cdot \text{cm}$ のSi基板の少数キャリア寿命として少なくとも数msは必要で，23%近い値が得られる事が判る。この場合，表面再結合速度として $1 \times 10^3 \text{ cm/s}$ と小さい事が必要である。更に，厚さ $50 \mu\text{m}$ で光完全閉じ込め型の薄型セルでの変換効率と表面再結合速度の関係を図-5に示す。高濃度効果や電極でのキャリア再結合を考えると24%が限界であり，電極での再結合を無視すると28%近い効率が得られると予想できる。この高濃度効果やオージェ再結合などを無視した理想的な場合では32%になるとエクソン社の研究者は発表し

た。

4. 太陽電池の開発状況

高効率セルを作製する際のポイントは、以上述べたシミュレーテッド構造を忠実に再現することである。又、実際のセル作製プロセスでは、汚染が必ずあるので、少数キャリア寿命が低下しない実質的にクリーンなプロセスの開発が重要である。一般のセルプロセスは、接合 (n^+/p , p/p^+)、反射防止膜と電極プロセスなどから成り、多くの技術が開発されている。

初めて変換効率20%を達成したニューサウスウェールズ大学のセル構造はPESC (Passivated Emitter Solar Cell) と呼ばれ、 n^+ 型表面を酸化して生成キャリアの再結合を減らし、表面に微細なV溝を設けて入射光の反射および n^+ 層の抵抗を減らしたものである。図-6に示したように、このセル構造の上部に接触面積の小さい微細電極を設けてキャリア再結合の低減を図った。FZ法で作製した抵抗率 $0.2\Omega \cdot \text{cm}$ の高品質単結晶基板を使い、効率20.9% (セル面積 4cm^2)を得た。さらに、89年にPERL (Passivated Emitter Rear

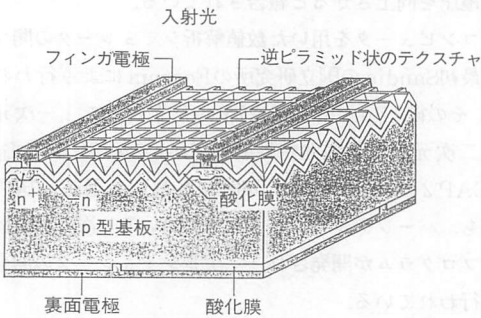


図-6 「PERC (Passivated Emitter Rear Contact) 型」の高効率セル構造オーストラリアのニュー・サウス・ウェールズ大学が試作したセル

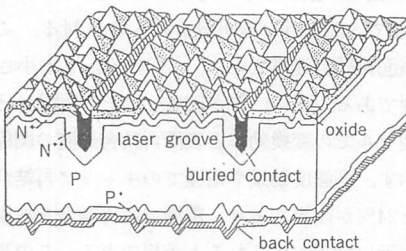


図-7 UNSW大で開発した単結晶Si基板での Laser Grooved Buried Contact Cell構造

Locally Diffused Cell) のセル構造で効率23.2%を達成した。その短絡電流密度は $41.3\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧は 0.696V 、曲線因子は 0.81 であった。低コスト化の方法として (図-7参照)、レーザーで溝を作製し

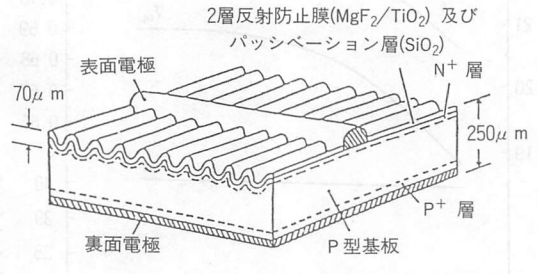


図-8 シャープセル構造

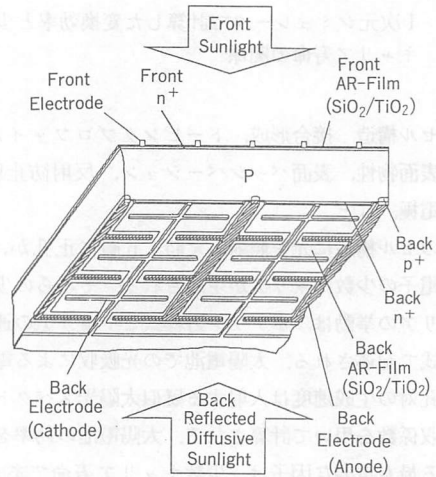


図-9 日立で開発したバイフェイシャル型セル構造

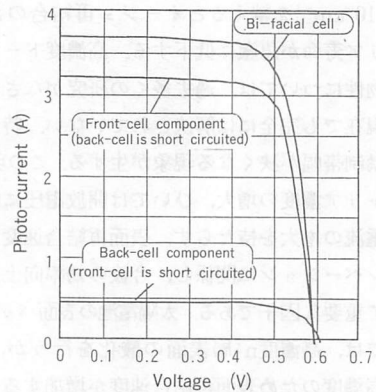


図-10 バイフェイシャル型セル構造の電流-電圧特性

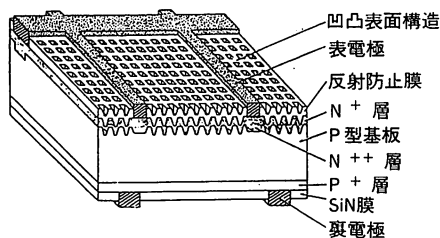


図-11 京セラセル構造

メッキ法で電極を埋め込む方式で影の面積を減らし効率20%を得ており、この技術で7cm角のセルを作製し効率20%のモジュールの試作に成功した。モジュールの面積は743cm²で、開放電圧11.07V、短絡電流1.767A、曲線因子0.781であった。

スタンフォード大学で開発したポイントコンタクト型セルでは、SiO₂/Si界面が太陽光下で劣化する事が明らかにされた。この点に関し、n層を表面に導入する事により改良されており、効率22%、開放電圧として最高0.703Vと初めて0.7Vを越える値が得られた。

一方、日本における単結晶および多結晶Si太陽電池の効率も改善されている。特に、低コストプロセス技術を用いた大面積セルの効率は単結晶で20%、多結晶で17%と世界トップレベルに達している。

シャープでは、10cm角の住友シチックス社製のキャスト多結晶基板で効率17.2% (J_{sc}=36.4mA/cm², V_{oc}=0.610V, FF=0.777) を得た。そのセル構造を図-8に示す。表面には、ダイシング法により微細グループが機械的に形成されそのピッチは70μm、電極ピッチは2.5mmと微細化されている。その加工したシリコン表面には酸化膜とTiO₂系2層反射防止膜が被着されている。

日立も10cm角のキャスト多結晶シリコン基板を用い、新しい3電極構造で効率16.3%を得ている。図-9

に示したように、n⁺/p/p⁺の通常のセル構造の裏面にn⁺を集約的に設けたバイフェイシャルセル型構造となっている。この構造により裏面電極の形状を変更すれば裏面からの光入射も可能で短絡電流が増加する。地上設置型システムでは地上からの反射(いわゆるアルベド)が可なり期待できる。このセルの電流-電圧特性は図-10に示すようにフロントセルと裏面セルの合計となる。基板厚さ160μmで効率16.8% (I_{sc}=3.74A, V_{oc}=0.596V, FF=0.756), 120μmで15.3%が得られている。

京セラのセルは15cm角と面積比2.25倍でありモジュール化後の(図-11)効率向上が期待される。表面の反射を低減するためホトリソグラフィとエッチングにより凹凸構造を形成し、電極構造の最適化およびMgF₂/SiN2層反射防止膜の構造で効率は16.4% (J_{sc}=35.4mA/cm², V_{oc}=0.611V, FF=0.759) を得ている。なお、SiN膜は両面に形成され欠陥のパッシベーションを行っている。

5. 今後の課題

以上述べたごとく、最近の研究開発の進展により下記の技術的見通しが得られた。

- 1) 高効率化研究が進み、セル効率で23%が得られた。
- 2) 大面積多結晶型太陽電池で効率17%が得られた。

研究開発の観点からは、次の三項目が重要で今後継続して取り組む必要があると考えられる。

- 1) 高効率のセルを工場で低コストで製造できる技術の開発。
- 2) 変換効率23%以上を旨とした超高効率セルの基礎研究
- 3) 高効率で低コストのモジュール製造の研究開発。

本研究の一部は、サンシャイン計画の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構により推進されているもので、関係各位に深く感謝いたします。

特集

太陽電池実用化の取り組み

セル高効率化技術の開発動向

② 薄膜太陽電池の開発動向

Technical Status of Thin Film Solar Cells

小長井 誠*
Makoto Konagai

1. はじめに

薄膜太陽電池とは、半導体層が数 $10\mu\text{m}$ ～数 μm 以下の厚さの太陽電池である。半導体層が薄いため、ガラスや高分子フィルムなど何等かの基板が必要となる。半導体層が薄いのが故に低コストで製造可能と期待されている。薄膜太陽電池には、アモルファスSi系、化合物薄膜系、結晶Si薄膜系がある。

2. 薄膜太陽電池の開発目標

我が国における太陽光発電の最終目標は、太陽電池を住宅の屋根に設置し自家発電することである。結晶Si系であっても、薄膜系であっても、太陽電池を用いた場合の発電コストが、現在の商用電源と同じか、それ以下にならないと普及は困難である。薄膜太陽電池では、変換効率10～15%のモジュールを低コストで製造することが目標となる。実際に変換効率10%の太陽電池を100万kWp/年程度製造すると仮定すると、面積にして 10^7m^2 となる。簡単のために1m幅の太陽電池モジュールを想定すると、何と 10^4km もの長さに対応する。製造装置の稼働率を年間100%と仮定しても、毎分20mのモジュールを製造しなければならない。これだけの量を製造するには、単純なプロセスで、高速化が可能で、しかも再現性のよいプロセスを導入しなければならない。薄膜太陽電池は、これらの量産化の要求に適った材料系であると言える。

3. 薄膜太陽電池の変換効率の限界と現状

太陽電池の変換効率の理論限界は、半導体の禁制帯幅で決る。図-1は単結晶半導体を用いた場合の予想される変換効率を示している。単結晶Si太陽電池の理論限界は～28%である。一方、薄膜太陽電池では、多結

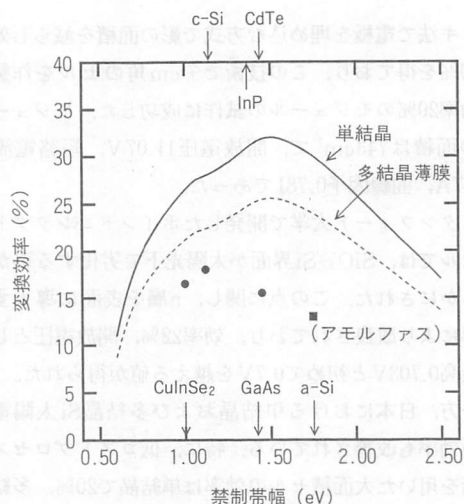


図-1 太陽電池の理論効率。薄膜太陽電池の理論効率は、単結晶太陽電池の80%と仮定した。
図中の●、■印は薄膜太陽電池の実測値。

晶で用いられることが多いので、単結晶の理論をそのまま用いることはできない。現状では、多結晶Si（キャスト）太陽電池の変換効率は、単結晶Siの8割程度となっている。そこで、図-1では、単結晶太陽電池の理論効率の80%の値も示してある。アモルファスSi系では、図-1に示す理論は適用できない。筆者らによる解析では、アモルファスSi太陽電池の変換効率の理論限界は～15%となる。

また図-1には、薄膜太陽電池の変換効率の現状（詳しくは後述）も示されている。CuInSe₂系、CdTe系では、変換効率15%以上が達成されているが、理論限界と比較すれば、まだまだ技術開発の余地を残していることがわかる。

4. アモルファスSi系薄膜太陽電池

4.1 生産量の現状

我が国で低コスト太陽電池として最も期待され、ま

* 東京工業大学工学部電気電子工学科教授

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

た技術開発が進んでいるのがアモルファス太陽電池である。アモルファスSi太陽電池は、現在、電卓や腕時計などの民生用機器電源として多量に用いられている。表1に1992年の全世界の薄膜太陽電池の生産量を示す。現状の生産量は10MWレベルであり、これらの大部分が民生用途である。薄膜太陽電池を電力用として本格的に実用化していくには、この10倍程度の生産量が必要である。

表1 1992年における世界の薄膜太陽電池出荷量 (P. Maycock氏の調査による) (単位 MWp)

太陽電池	日本	米国	欧州	その他	合計
a-Si	10.9	1.5	1.4	1.0	14.8
CdTe	1.0	0	0	0	1.0

(大部分民生用途であるが、この表では、製造面積で電力用に換算してある)

4.2 コスト試算とエネルギー回収年

アモルファス太陽電池のコストは、生産規模に大きく依存する。数MW程度の生産規模では、500円/Wp以上になってしまう。アモルファス太陽電池のメリットが発揮されるのは、生産規模が50MWp以上になったときである。試算によると100MWpの生産規模で100円/Wp程度となる。同じ生産量で比較すると、キャスト法による多結晶Si太陽電池より50円/Wp安くなる。アモルファスSi太陽電池では、ラインにガラス板を入れてから、モジュールが取りだされるまでの全ての工程を一貫して行うことができる。これが低コスト化への決め手となっている。量産する際、同じ装置を多数並べていたのでは低コスト化は不可能である。アモルファス太陽電池は、巨大な1台の装置で、連続した一貫生産ができるという特長がある。

またアモルファス太陽電池は、プラズマCVDという低温プロセスで形成されること、ならびに一貫生産できることから、エネルギー回収年(EPT)が短くなる。EPTとは、製造に要するエネルギーを太陽電池による発電で回収すると仮定すると、何年で元を取れるかを表すパラメータである。EPTは小さければ小さいほど、エネルギー源としての価値が高くなる。100MWpの生産量に対して、アモルファス太陽電池のEPTは1年程度となる¹⁾。言うまでもなく、この値は、Siを一度溶かすプロセスが必要な結晶系Si太陽電池よりも遥かに小さい。

4.3 高効率化の現状と課題

図-2は、代表的なアモルファス太陽電池の構造を示

している。基板には、ソーダライム・ガラスを用い、透明導電膜SnO₂ (あるいはZnO)、アモルファスSi(a-Si) pin/金属電極が積層された構造となっている。大面積モジュールでは、一枚のガラス板上に細長い太陽電池が多数個直列に集積化された構造となっている。太陽電池を1枚1枚、リード線で結線している結晶型Si太陽電池とはモジュール構造が本質的に異なる。1枚の大面積ガラス基板上に集積形太陽電池を形成できるのが低コスト化の一つの要因である。

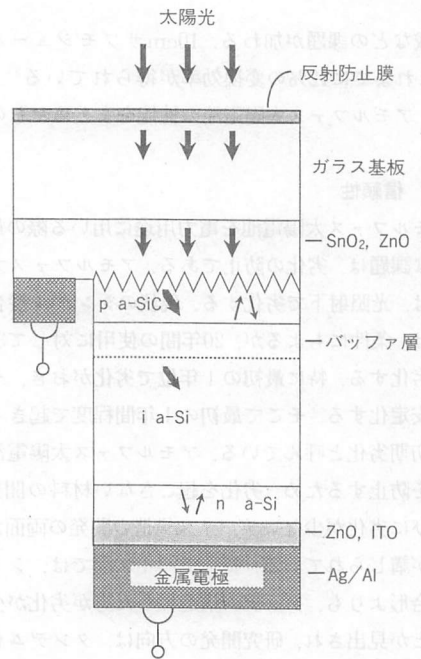


図-2 代表的なアモルファスSi太陽電池の構造 (シングル接合形)

アモルファス太陽電池はμm以下の薄い層が何層も積層された構造となっており、高効率化には、透明導電膜(TCO)、p、i、n各層の改善、ならびにTCO/p界面、p/i界面などの改善が必要である。まずp層に関しては、SiCやSiOによるワイドギャップ化や超格子構造による高品質化が進められている。i層に関しては、プラズマ内でのラジカル制御や、超高真空チャンバの導入が行われている。これらの高効率化技術の採用により、小面積(1cm²)では、13.2%が得られるに至っている²⁾。一方、10cm角以上の大面積集積形セルでは、小面積セルの高効率化技術に加えて、集積化のためのレーザー加工技術、大面積基板上への均一な

表2 アモルファス太陽電池の変換効率

構造	面積 (cm ²)	変換効率 (%)	研究機関	技術のポイント
a-Si シングル接合	1	13.2	三井東圧	p層を多層化/グレイディッド構造スーパーチャンバ, p, p/i界面の水素処理
	100	12.0	三洋電機	
a-Si/a-Si	1	12.0	富士電機	a-SiO ₂ p層
2層タンデム接合	1,200	10.5	富士電機	大面積, 高信頼化
a-Si/a-Si/a-SiGe	0.25	13.7	ECD	ステンレス基板
a-Si/a-Si/a-SiGe	1	12.1	三洋電機	スーパーチャンバ, 水素希釈
3層タンデム接合	789	11.3	SOLAREX	水素希釈, 微結晶n

膜形成などの課題が加わる。10cmサブモジュールでは、これまでに12%の変換効率を得られている³⁾。表2は、アモルファス太陽電池の性能をまとめたものである。

4.4 信頼性

アモルファス太陽電池を電力用途に用いる際の最も重要な課題は、劣化の防止である。アモルファス太陽電池は、光照射下で劣化する。現状のシングル接合セルでは、条件にもよるが、20年間の使用に対して30%以上劣化する。特に最初の1年位で劣化がおき、その後は安定化する。そこで最初の1年間程度で起きる劣化を初期劣化と呼んでいる。アモルファス太陽電池の劣化を防止するため、劣化を起こさない材料の開発、ならびに劣化が少ないデバイス構造の開発の両面から対策が講じられている。特にデバイス面では、シングル接合形よりも、タンデム構造にした方が劣化が少ないことが見出され、研究開発の方向は、タンデム化に向かいつつある。最近では、アモルファス太陽電池開発の課題が、初期効率を向上させることから、初期劣化後の変換効率を高くする方向に変化しつつある。例えば、単純にi層を厚くして初期効率を高めたセルは、初期劣化も激しいのに対し、i層を薄くしたセルは、初期効率は少し劣るものの、安定化後の変換効率は、i層が厚いものよりも高くなる。

図-3は代表的なa-Si/a-Siタンデム太陽電池の光劣化特性を示したものである⁴⁾。この構造では、30cm×40cmの大面積モジュールで10.5%の変換効率を得られている。また初期劣化(1年間の屋外暴露相当)は約15%となっており、その後は安定する。今後の開発が進めば、タンデム化により光劣化を10%以内に抑えるとともに、安定化後の変換効率が10%以上のモジュールが形成可能であると期待されている。また、今後の一層の高効率化という点では、a-Si(a-SiC)/a-Si

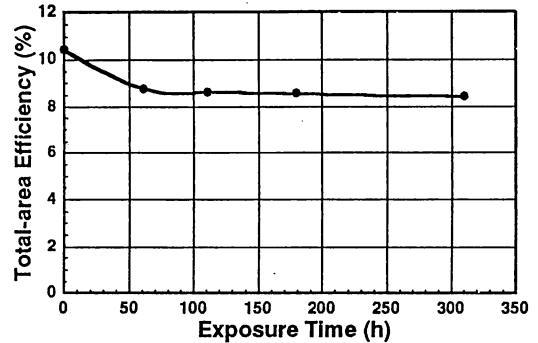


図-3 a-Si/a-Si 2層タンデム太陽電池モジュール(30cm×40cm)の劣化特性。

/a-SiGe 3層タンデムに期待が寄せられている。これまでに小面積で13.7%の変換効率を得られているが、理論通りの高い効率を得るには、a-SiGe, a-SiCの高品質化が重要な課題である。

5. 化合物薄膜太陽電池

5.1 CuInSe₂薄膜太陽電池

CuInSe₂薄膜太陽電池は、最近急に注目を集めるようになった。これは、14~15%とアモルファス太陽電池をはるかに凌ぐ高効率を得られたことと、CuInSe₂は、長期の屋外暴露試験でも劣化が認められないこと、などによる。また、将来的には、CuInSe₂にGaやSを添加すれば、20%以上の高効率をも狙えることも見逃せない特長である。

CuInSe₂薄膜は、真空蒸着法やセレン化法などで形成される。これらの手法には、それぞれ特徴があるが、膜の基礎物性を知るには真空蒸着法が最も理解しやすい手法である。一方、将来の量産化を考えた場合は、セレン化法の方が有利である。セレン化とは、基板上にCu, Inを積層した後、H₂SeやSe蒸気中で熱処理

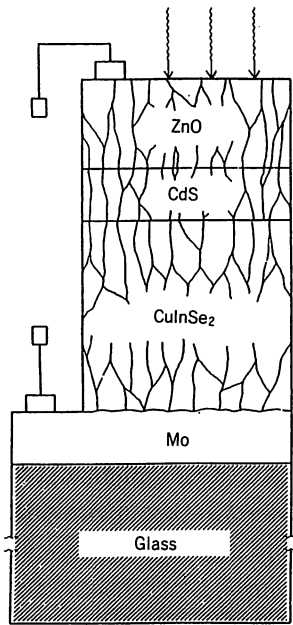


図-4 CuInSe₂薄膜太陽電池の構造

してCuInSe₂を合成する手法である。

図-4は代表的なCuInSe₂薄膜太陽電池の構造を、また表3は変換効率の現状をまとめたものである。まずHedstrom (スウェーデン)らは、ドイツのSchockらのグループと共同でCuInSe₂太陽電池開発を進めている。製膜には三源蒸着を用いている。このグループの製膜法の最も特徴的な点は、膜厚方向に基板温度や組成を細かく制御している点である。具体的には、最初Cuリッチの膜を堆積させて粒径を大きくし、次第にInリッチとすることで高効率化に必要なCu/In比を得ている。基板温度が500℃前後と高いことも特徴である。同様の手法でCu (GaIn) Se₂太陽電池も作製している。この手法で作製したCuInSe₂ならびに

CuInGaSe₂太陽電池の効率は表3に示されている。面積0.4cm²で、それぞれ15.4%、16.9%が得られている⁵⁾。16.9%という値は、これまでに知られた、すべての薄膜太陽電池の中で最も高い。

またSiemens SolarのTarrantらは、CuInSe₂にGaやSを添加した混晶系太陽電池で大きな成果を得ている。CuInSe₂の禁制帯幅は1.0eVであるが、太陽電池としての最適な禁制帯幅(1.4~1.5eV)よりも小さい。一方、CuInSe₂にGaやSを添加すると禁制帯幅を最適値に近づけることが可能であり、より一層の高効率化が見込まれる。Tarrantは、禁制帯幅を一定にしたCu (In, Ga) (Se, S)₂太陽電池、活性層の禁制帯幅をグレイディッドに変化させたCu (In, Ga) (Se, S)₂太陽電池、さらにCu (In, Ga) Se₂太陽電池を研究している。製膜法は公表されていないが、H₂Seを用いたセレン化法と思われる。グレイディッドの構造の採用により15.1%の変換効率を得られている。面積は3 cm²である⁶⁾。

5.2 CdTe薄膜太陽電池

最近、CdTe薄膜太陽電池の開発も急速に進んでいる。すでに表1に示されているように、CdTe太陽電池の生産量は1 MWp (1992年)となっている。これらの太陽電池は我が国でスクリーン印刷法により製造されたものである。CdTeは2元化合物であるため、CuInSe₂系と異なり組成制御性は問題とならない。CuInSe₂系とCdTe系は効率面で常に競合してきた。現状では、小面積セルの効率では、CuInSe₂系の方が上であるが、生産技術としてはCdTe系の方が進んでいる。

CdTe太陽電池の変換効率は、この1年間で小面積セル、大面積モジュールともに進展が見られた(表4)。最近のトピックスは、近接法によるCdTe太陽電池である。まず、南フロリダ大のグループは、小面積

表3 代表的なCuInSe₂系薄膜太陽電池の性能

構 造	面 積 (cm ²)	変換効率 (%)	研究機関	技術のポイント
ZnO/CdS/Cu(InGa)Se ₂	0.4	16.9	SIM, RIT, シュツットガルト大	4源蒸着, 高温形成
ZnO/CdS/CuInSe ₂	0.4	15.4	同 上	同 上
ZnO/CdS/Cu(InGa)(SeS) ₂	3	15.1	Siemens Solar	セレン化, 傾斜組成
ZnO/CdS/Cu(InGa)Se ₂	3	14.1	同 上	セレン化
ZnO/ZnCdS/Cu(InGa)Se ₂	1	13.7	Boeing	4源蒸着
ZnO/CdS/CuInSe ₂	938	11.1	Siemens Solar	セレン化
ZnO/CdS/CuInSe ₂	3916	9.7	同 上	セレン化

表4 代表的なCdTe薄膜太陽電池の性能

構 造	面 積 (cm ²)	変換効率 (%)	研究機関	技術のポイント
ガラス/SnO ₂ /CdS/CdTe	1.05	15.5	South Florida大学	近接法
ガラス/SnO ₂ /CdS/CdTe	7,200	7.47	Solar Cells	近接法, 集積化モジュール
ガラス/CdS/CdTe	1,200	8.72	松下電池工業	印刷・焼結
ガラス/SnO ₂ /CdS/CdTe	706	10.1	BP Solar	電着法

ながら15.8%の効率を得ている⁷⁾。一方, Solar Cell社では, 近接法により60cm×120cmという大面積モジュールを近接法により作製し, 初期段階ながら7.7%の変換効率を得ている⁸⁾。

6. 結晶Si薄膜太陽電池

Siは, もともと吸収係数が小さいため, 薄膜構造は不利であると考えられてきた。最近, Siでも反射効果を利用し, 光路長を長くすれば, 10μm程度の厚さでも十分高い変換効率を得られるとの認識に変わりつつある。これまでに, 気相法で堆積した膜を固相結晶化や溶融結晶化などを用いて高品質化する手法が報告されている。ここでは, 紙面の関係で表5に開発状況を示すにとどめる。なお, 表5に示した構造以外に, 単結晶SiやキャストSi上へアモルファスSiを堆積し, 接合を形成したものなどがあるが, これらは薄膜ではなく, いわゆるバルク形に属するのでここでは省略した。

7. 超高効率化を目指して

我が国では, 平成2年度から超高効率化の研究・開発が国家プロジェクトとして取上げられたこともあり, 薄膜系でも超高効率化技術が注目を集めている。ここでは, 超高効率化のためのタンデム形太陽電池の現状を紹介する。タンデム形は2種類の材料から成る太陽電池を重ねて動作させるものである。高エネルギーの光子は, トップセルと呼ばれる禁制帯幅の大きな材料でエネルギー変換し, トップセルを透過してきたエネルギーの低い光子は, 禁制帯幅の低い材料

(ボトムセル)でエネルギー変換しようとするものである。理論的には, 薄膜でも25%前後の変換効率が期待される。

これまでにアモルファスSiとCuInSe₂の4端子薄膜タンデム太陽電池が報告されており, 4cm²で15.6%が得られている⁹⁾。また, 大面積化の試みもなされており, 0.4m²のモジュールで10.5%の変換効率を得られている。

この他, CuInSe₂とCdTe, a-SiとCdTe, a-Siと多結晶Siなどの組合せが報告されている。将来的には, 薄膜系同志の組合せで20%を超す変換効率の実現が期待されている。

8. むすびと今後の展開

薄膜太陽電池の変換効率は年々向上しているが, 開発のレベルは各材料系で大きく異なる。まずアモルファス系では, 小面積での議論から次第に大面積での性能向上, ならびに初期劣化後の変換効率向上へと移行しつつある。初期効率向上という点では, シングル接合セルですでに13.2%が得られており, 今後の開発が進んでも, 最終的には14~15%が限界と考えられる。当面は, 初期劣化後のモジュール効率10%以上が開発目標となろう。この目標が達成できれば, アモルファスの実用化は一気に進むものと期待される。アモルファス系で変換効率を飛躍的に向上させるには, タンデムの開発が急務であり, これには高品質a-SiC, a-SiGeの開発が必要不可欠である。これらの合金系材料の高品質化を図るには, 奇抜なアイデアによる新製膜法

表5 多結晶Si太陽電池の現状

構 造	面 積 (cm ²)	変換効率 (%)	研究機関	技術のポイント
薄膜多結晶Si/ガラス	1	6.3	三洋電機	固相成長
薄膜多結晶Si	100	14.2	三菱電機	溶融再結晶化(ZMR)
薄膜多結晶Si/セラミック	100	10.9	AstroPower	液相成長
同上	675	(試作中)		集積形

の開発が望まれる。

一方、CuInSe₂系に関しては、16.9%という高い効率は得られているが、この系では多数の元素の比を精密に制御する必要があり、量産化という面でややマイナス面は残る。しかし、信頼性は高くしかも将来の超高効率太陽電池材料としても有望であることから、製造技術面でのブレイクスルーがあれば電力用としての実用化は早い。また、CdTeに関しては、2元化合物であることから、組成制御の問題はなく、量産化に適した材料と言える。また、今回は詳しく議論しなかったが、あるコスト試算では、CdTe太陽電池の製造コストはアモルファス以上に低くなる可能性がある。従って、この系では、Cdを扱う安全面での対策が充分施されれば、早期の実用化が可能である。

最後に多結晶Si薄膜太陽電池に関しては、まだまだ初期段階なので明確な判断は難しいが、資源的に豊富な元素を使っていること、公害など心配せずに安心して用いられる材料系であることなどの利点があるので、高効率化、低コストが実現できれば将来性は高い。しかし、もともと間接遷移形材料で吸収係数の小さい材

料であるから、裏面反射、斜め入射などにより極力、光路長を伸ばす努力をしても、高効率化が最後まで付きまとう難しい技術課題となろう。

文 献

- 1) T. Matsuoka, N. Okuda and Y. Kuwano, Opto-electronics-Devices and Tech., 5, 171(1990)
- 2) H. Tanaka, N. Ishiguro, T. Miyashita, N. Yanagawa, M. Sadamoto, M. Koyama, K. Miyachi, Y. Ashida and N. Fukuda, 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., May 9-14, Louisville, Kentucky (1993)
- 3) E. Maruyama, A. Terakawa, K. Sayama, K. Ninomiya, Y. Hishikawa, H. Tarui, S. Tsuda, S. Nakano, and Y. Kuwano, ibid
- 4) Y. Ichikawa, S. Fujikake, T. Takayama, S. Saito, H. Ota, T. Yoshida, T. Ihara and H. Sakai, ibid
- 5) J. Hedstrom, H. Ohlsen, M. Bodegard, A. Kylvner, L. Stolt, D. Hariskos, M. Ruckh and H. Schock, ibid
- 6) D. Tarrant and J. Ermer, ibid
- 7) C. Ferekides, J. Britt, Y. Ma, and L. Killian, ibid
- 8) J. F. Nolan, ibid
- 9) K. Mitchell, C. Eberspacher, J. Ermer, K. Pauls, D. Pier and D. Tanner, Proc. PVSEC-4 (1989) 889

共催行事ごあんない

“次世代技術におけるエネルギー最前線” について

<主 催> 化学工学会東海支部

<共 催> エネルギー・資源学会 他

<日 時> 平成5年10月14日(木) 9:00~17:00

<会 場> 愛知県水産会館(名古屋市中区丸の内3-4-31, TEL 052-971-3501)

<プログラム>

1. 新しいエネルギーシステム 4件

2. エネルギー利用最前線 4件

■ 連絡先 名古屋市中区栄2-17-22 中部科学技術センター内

化学工学会東海支部 TEL 052-231-3070, FAX 052-204-1469

特集

太陽電池実用化の取り組み

セル高効率化技術の開発動向

③化合物半導体系セル

Compound Semiconductor Solar Cells

山口 真 史*

Masafumi Yamaguchi

1. はじめに

太陽電池材料は結晶SiやアモルファスSiの他、GaAsやInPなどのⅢ-V族化合物半導体、CdTeやCdSなどのⅡ-VI族化合物半導体と広範囲にわたっている。従来、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池は、高性能だが高いことから実用化は難しいと考えられていた。しかし、GaAsやInPセルは宇宙用として実用化されるに至っている。さらに、低価格化を狙った薄膜太陽電池や超高効率化を狙った多接合構造太陽電池などの新しい技術も開発されつつあり、化合物半導体太陽電池の研究開発も着実に進展している。

表1に、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池の研究開発

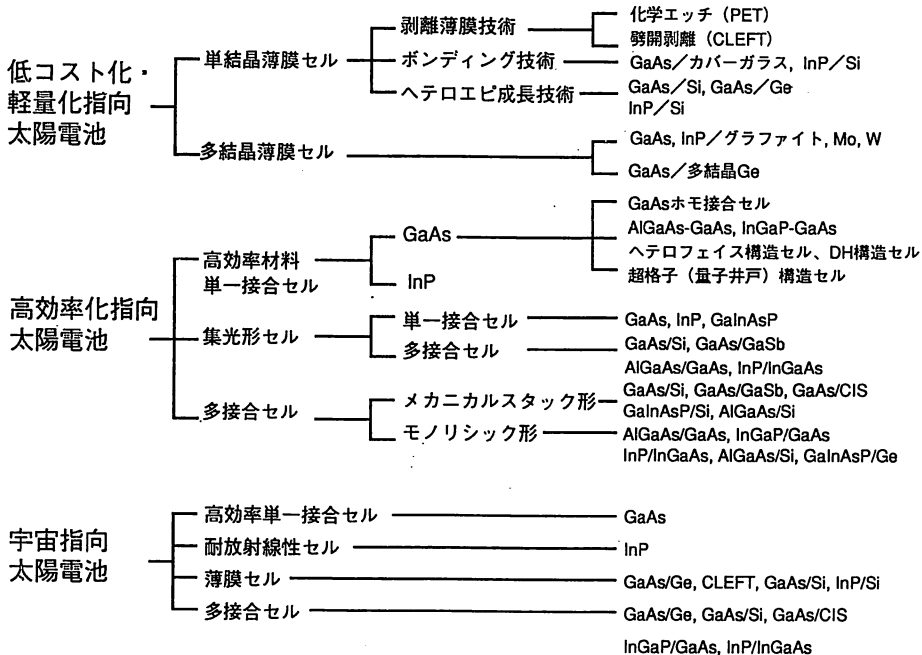
内容¹⁾を示す。化合物半導体太陽電池の研究開発の流れは、下記のように分類される。

- ①民生機器や電力用として、低価格のもの
 - ②高効率化の極限を追求したもの
 - ③宇宙用として、高効率で放射線に対して強いもの
- 本稿では、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池の高効率化技術を中心に、その開発動向、応用例と今後の課題について述べる。

2. 高効率太陽電池の研究開発動向

Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池の最も優れた点は、GaAsやInPなどの禁止帯幅が太陽光スペクトルに整合した最適な値に近く、光電変換効率が高いことで

表1 Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池の研究開発内容¹⁾



* NTT 光エレクトロニクス研究所主幹研究員
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根162

表2 III-V族化合物半導体太陽電池の損失要因と高効率化の手法

	損失要因	改善策
真性損	透過損失	タンデム化
	過剰励起損失	
外因性損	光の反射損	多層反射防止膜 Textured Surface
	光の透過損	BSR構造, Bragg反射構造
	シャドローイング損	電極形状最適化
損失	バルク再結合損	ドーピング不純物最適化 結晶欠陥, 深い不純物の低減
	表面, 界面, 裏面再結合損	ヘテロフェイス, graded Eg BSF構造, 表面パッシベーション
	直列抵抗損失	電極構造, ドーピングレベル, 層構成
	並列抵抗損失	加工損傷・汚れの除去 端面パッシベーション

ある。太陽電池の損失要因を抑制することによる高効率化の種々のアプローチがあるが、III-V族化合物系セルに限っても、表2に示すように、多くの高効率化の手法がある。III-V族化合物半導体太陽電池の高効率化の手法には、①高効率材料による単一接合セル、②集光形セル、③太陽光スペクトルの広帯域利用形セル（多接合構造セル）、などがある。

2.1 単一接合セル

図-1に、GaAs太陽電池を例に、高効率太陽電池の構造を示す。材料・プロセス技術面では、①キャリア収集、光吸収効率の面からのセル構造の改良、②接合

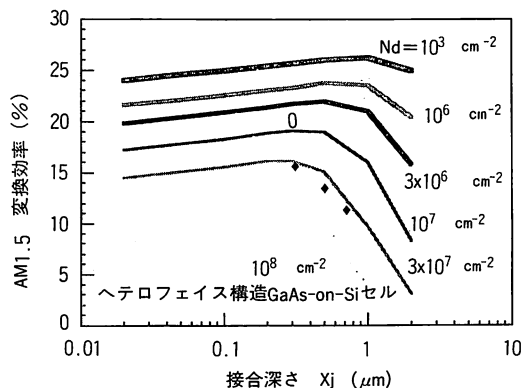


図-2 GaAsヘテロフェイス太陽電池の理論変換効率 (GaAs-on-Siセルを例として)

形成法、③再結合中心として働く不純物・欠陥の除去、などがある。

(1) セル構造の改善による高効率化

理論的に、GaAsやInPなどで高効率期待でき、単一接合による高効率化が検討されている。GaAsの表面再結合速度は、 $10^6 \sim 10^7$ cm/secと大きい、結晶表面でのキャリア再結合による効率低下を避ける構造として、AlGaAsの窓効果を利用したAlGaAs-GaAsのヘテロフェイスセルがIBMから提案されて²⁾以来、宇宙用太陽電池への適用を狙いとして、Spire, Hughes, Applied Solar Energy Co.

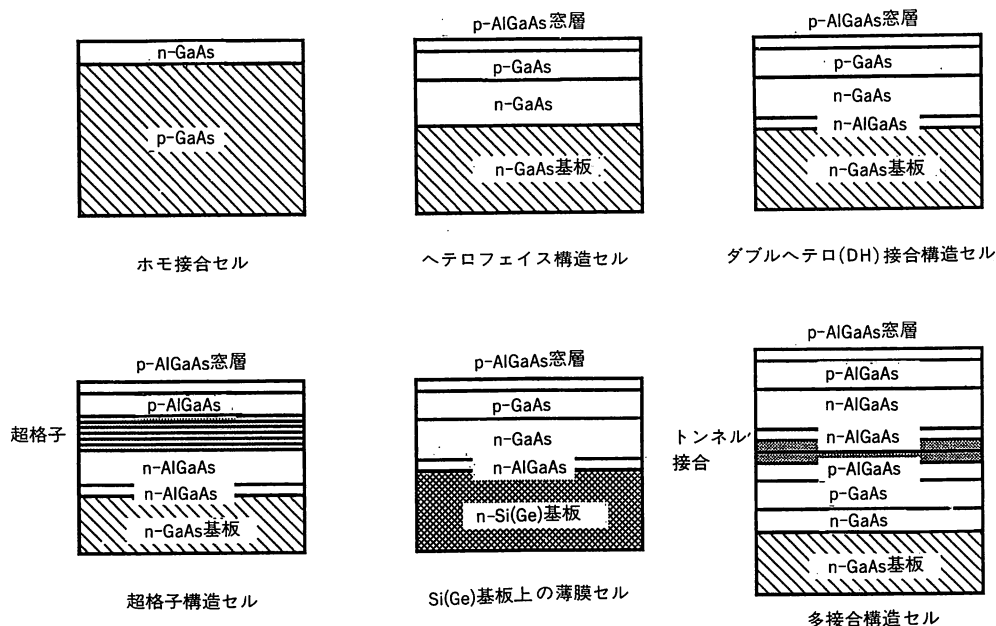
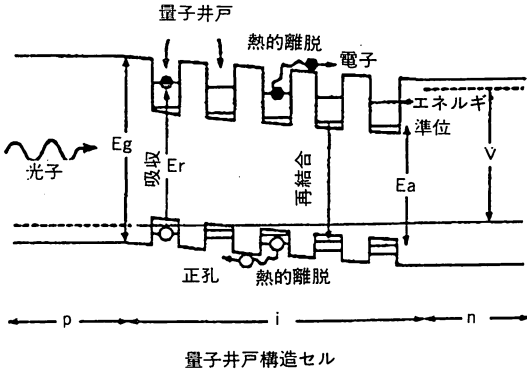
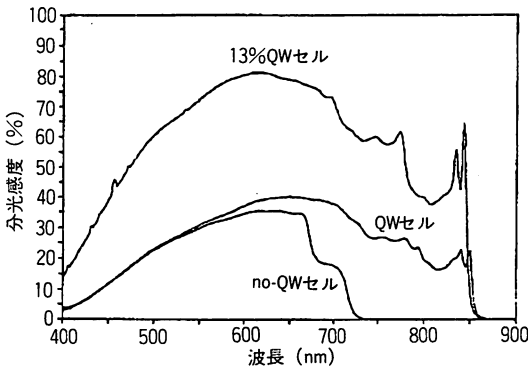


図-1 化合物半導体太陽電池の構成 (GaAsセルを例として)



量子井戸構造セル



QW-セルとno-QWセルの分光感度特性

図-3 量子井戸 (QW) 構造 AlGaAs 太陽電池と分光感度特性

(ASEC) などで精力的な研究開発が進められている。図-2に、GaAs ヘテロフェイス太陽電池の理論変換効率を示す。ホモ接合構造では、20%以上の高効率を得るには、接合深さを 500Å 以下にする必要があるが、

ヘテロフェイス構造では、広い禁止帯幅の窓層の挿入により、接合深さ設定の自由度が増し、高効率化が実現できる。

ここ数年、GaAs 太陽電池の高効率化が着実に進展し、高効率太陽電池は、III-V 族セルが最適との印象を強くしている。NREL, Kopin では、有機金属気相成長 (MOCVD) 法で、GaInP-GaAs, AlGaAs-GaAs のダブル・ヘテロ接合 (DH) 構造により、AM1.5 効率 25.7%, 25.1% を達成している³⁾。DH 構造では、ヘテロフェイス構造における窓効果に加えて、裏面電界 (BSF) 効果が期待できる。図-1 に示すように、単一接合セルの構造も、初期のホモ接合から、ヘテロフェイス構造、DH 構造、最近の量子井戸 (QW) 構造セルへと進展している。英国王立科学大学では、50QW から成る i 層を持つ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ p-i-n 構造太陽電池 (図-3) において、効率 13% (AM1.5) を得ており⁴⁾、QW なしのものに比べて、分光感度の改善が確認されているが、高開放端電圧の実現が課題である。

InP は、表面再結合速度が 10^3 cm/sec 程度と GaAs のそれに比べて低く、簡単な pn 接合セルで高効率化が可能である。著者らは、熱拡散法、液相エピタキシャル成長 (LPE) 法、MOCVD 法により種々の InP 太陽電池構造の作製を検討し、AM1.5 で 22%、AM0 で 18% を達成する⁵⁾ と共に、InP 太陽電池が Si や GaAs 太陽電池よりも耐放射線特性に優れていることを見出している⁶⁾。現状の InP セルは、 n^+p-p^+ や p^+n-n^+ などのシャローエミッター構造が主であるが、課題は開放端電圧の向上で、窓層などの改良の他、プラズマ水素処理効果などの検討がなされている。

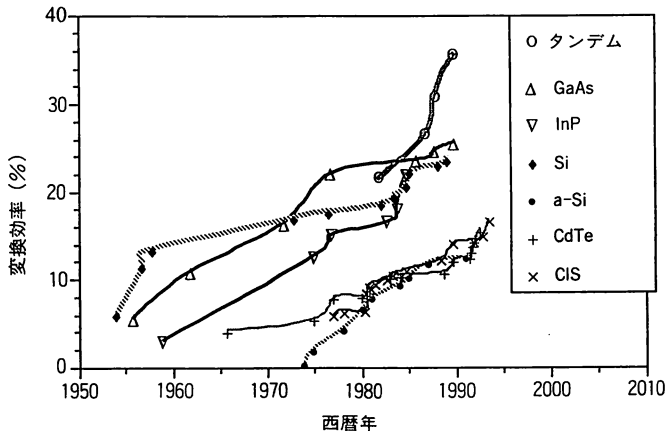


図-4 各種太陽電池の光電変換効率の年次推移

図-4に、各種太陽電池の光電変換効率の年次推移を示す。セル構造の改良、エピタキシャル成長技術などの進歩により、最近のGaAs、InPセルなどⅢ-V族化合物半導体太陽電池の高性能化の進展には目ざましいものがある。

(2) 接合形成法の改善による高効率化

高効率太陽電池作製のための接合形成技術として、エピ成長技術が優れている。エピ成長法による場合、セル構造の工夫ができ、光収集効率が得やすいという他に、太陽電池活性層の結晶性が良いという利点がある。一方、熱拡散法は、InPセル作製等に用いられ、低コスト化技術として位置づけられる。

エピ成長技術も、LPEからMOCVD、分子線エピタキシャル成長(MBE)法へと変遷している。LPE法は、簡単な装置で、高品質のエピ膜が得られ、セルの高効率化が実現できるため、1970年代の研究開発初期および1980年代の実用化初期に用いられてきたが、量産性や大面積化において劣る。MOCVD法は、精密制御性、大面積化、生産性に優れているため、1970年代後半から研究開発用に、1980年代後半から実用セル製造に用いられている。現在、高効率Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池のほとんどが、MOCVD法で製作されている。また、宇宙用GaAsセルの量産システムとして、三菱、ASEC等では、4~5cmウエハを40~48枚処理できるMOCVD装置も導入されている。さらに、MBE法は、前述のQW構造や多接合構造など、化合物組成や不純物分布の精密制御が必要な太陽電池構造製作に有効であり、最近検討され始めている。

(3) 材料の改善による高効率化

図-5に示すように、太陽電池の効率は、半導体層の

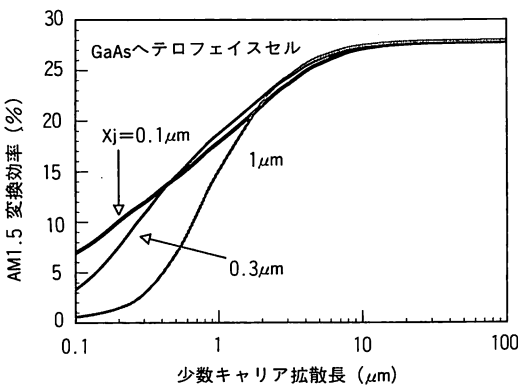


図-5 GaAs太陽電池の効率の少数キャリア拡散長依存性

少数キャリア寿命 τ (拡散長 L)に依存するので、高効率化には τ の向上が必要である。Ⅲ-V族化合物半導体の τ は、 $5 \times 10^9 / N$ (N :ドーピング密度)が上限ではあるが、最近では、フォトン・リサイクリング効果で、 τ は、放射再結合 τ を超える可能性が出て来ており、AlGaAs/GaAs-DH構造において、 τ として、 $1 \mu\text{s}$ 以上が得られている。InPについても、 $0.3 \sim 2 \mu\text{s}$ のデータが得られている。 τ や少数キャリア拡散長は、不純物の他、転位や各種格子欠陥、結晶粒界、表面などに影響されるので、セルの高効率化のためには、これらの抑制が必要である。

MOCVD法のAlGaAsの τ は、成長温度 T_g に依存し、高 τ のためには、 720°C 以上の高温が必要である。窓材料としても、従来、AlGaAsが用いられて来たが、酸素関与欠陥の発生が課題で、高 T_g とクリーンシステムが必要である。GaAsに格子常数がより整合し、酸素等の取り込みの問題もないInGaPが注目されている。前述したように、InGaP-GaAsヘテロフェイスセルで高効率化が達成され、InGaPの特長が発揮されている。

2.2. 集光形セル

化合物半導体太陽電池の場合、低コスト化には集光動作も有効であるため、集光形太陽電池の検討も進められている。化合物半導体セルは、高効率であると共に、集光動作時の温度上昇による効率低下がSiセルより少なく、約1000倍の高集光動作も期待できる。現在、GaAsヘテロフェイスセルを用いて、AM1.5の205倍集光で効率29.2%⁷⁾がVarianから報告されている。

2.3 多接合セル

単一接合セルでは、効率26~28%が限度である。さらに高効率化をはかるためには、波長感度帯域を拡大する必要があり、フィルター・ミラーにより太陽光スペクトルを分割し複数のセルで受光する波長分割型と太陽電池自身がフィルターとして動作する多層の接合を積層した多接合形が検討されている。現在では多接合形の検討が盛んである。図-6に示すように、タンデム構造セルでは、理論的に38~42%の高効率⁸⁾が期待できるし、本構造を構成できるのも化合物半導体の特長の一つである。

多接合構造太陽電池そのものの提案は古く、1955年のJackson、1960年のWolfに遡る。多接合形セルの構成例として、①トンネル接合により複数のセルを接続するモノリシック・カスケード型、②金属電極で

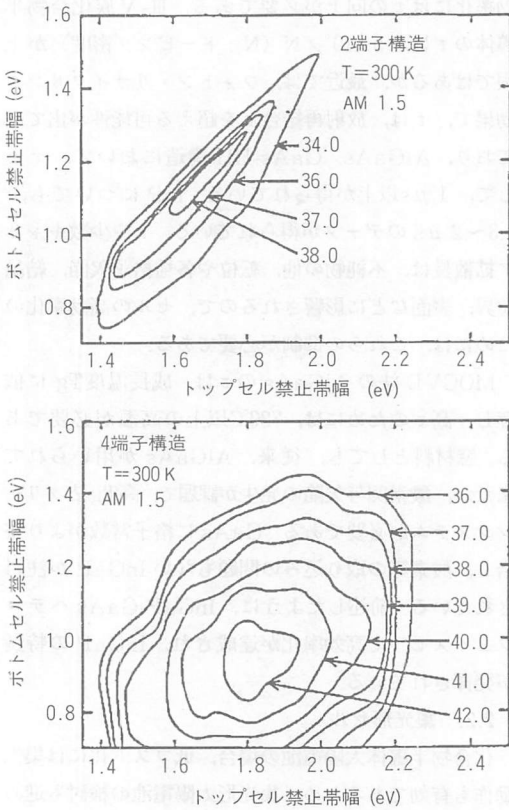


図-6 タンデムセルの理論効率

複数のセルを接続するメタル・インターコネクト型、③複数のセルを機械的に張り合わせたメカニカル・スタック型の提案がある。モノリシック型は、複数のセルを接続するトンネル接合において、低抵抗接続ができないなどの問題があり、これまでメカニカル型が主

に検討されてきた。最近、Boeing が GaAs/GaSb のタンデム構造セルの集光動作で効率35.8%を得ており⁹⁾、タンデムセルの可能性を示した点で注目される。

高集光動作でなくても、AlGaAs/GaAs のメタル・インターコネクト型のタンデムセルで効率27.6% (AM1.5) が得られている¹⁰⁾。また、モノリシック型でも、最近低抵抗のトンネル接合の形成に成功し、GaInP/GaAs のタンデムセルで効率27.3%¹¹⁾が得られるに至っている。また、集光動作では、InP/InGaAs モノリシック・カスケードセルで効率31.8% (AM 1.5の50倍集光) が達成されている¹²⁾。

タンデムセル実現に向け、要素技術の研究開発もなされている。トップセルとして、GaInAsP (1.65~1.75eV) /Si メカニカル・スタックセル実現に向けた GaAs 基板上に格子整合した Ga_{0.68}In_{0.32}As_{0.34}P_{0.66} n-on-p セルで、効率21.6% (AM0, active area) が得られている¹³⁾。InGaP₂/GaAs のモノリシック・カスケードセル実現に向けた GaAs 基板上のヘテロフェイス構造 GaInP₂n-on-p 単一接合セルで、AM 0 効率15.3%が実現している¹⁴⁾。

日本でも、通産省の新サンシャイン計画の超高効率プロジェクトで、AlGaAs/Si (Ge) や InGaP / Si タンデムセルの研究開発が進められている。

3. 低コスト化・軽量化指向太陽電池の研究開発動向

化合物半導体は、直接遷移型のエネルギー帯構造であるので、光吸収係数が大きいことは、薄膜太陽電池としての有用性を示している。III-V 族化合物セルでも、高効率の特長をいかしつつ低価格化、軽量化をはかる必要があるため、薄膜化が進行するものと考えら

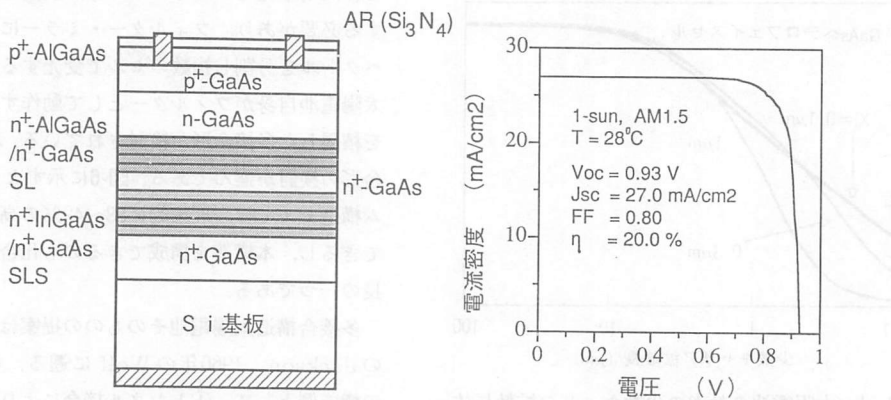


図-7 GaAs-on-Si 太陽電池の構造と特性

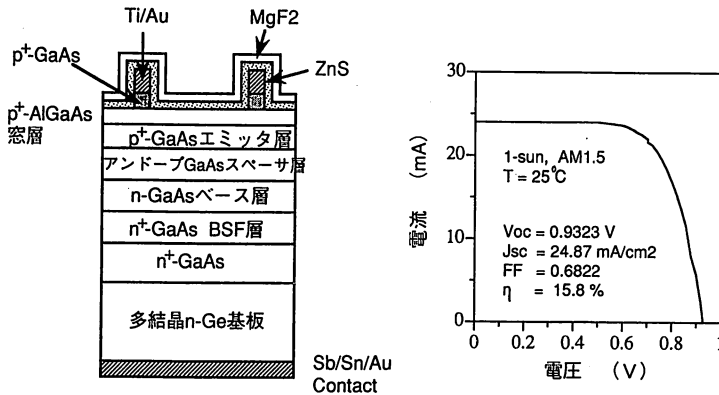


図-8 多結晶 Ge 基板上的 GaAs 太陽電池の構造と特性

れる。当面の研究開発ターゲットは、Si や Ge 基板上的 GaAs や InP 薄膜太陽電池である。

3.1 単結晶薄膜セル

Si 基板上への III-V 族化合物のヘテロエピタキシャル成長技術は、単に薄膜形太陽電池のみならず、各種光デバイス、電子デバイス、これらの複合デバイス等への波及効果があり、最近国内外で研究が活発化している。III-V on Si 構造における第一の課題は、Si 基板と III-V 族化合物との格子定数の不整合 (GaAs on Si の場合の不整合率は約 4%) に伴うヘテロ界面での高密度の不整合転位および熱膨張係数差に起因する熱応力誘起転位の発生とヘテロエピ膜中への転位の伝播にある。第二の課題は、両者の熱膨張係数の差に基づくヘテロエピ膜内でのクラックの発生であり、残留応力の低減をはかる必要がある。著者ら¹⁵⁾は、MOCVD 法による GaAs on Si セルで効率 20% (AM1.5) を達成している (図-7)。熱サイクルアニールや歪超格子層導入より、転位密度を 10^6 cm^{-2} 台に低減できたことが高効率化につながっている。

欧米では、Ge 基板上的 GaAs セルの研究開発が盛んである。Ge は GaAs との格子定数、熱膨張係数の整合が良く、結晶成長が容易なことによる。GaAs-on-Ge セルでは、ASEC の AM0 効率 20% の現状である¹⁶⁾。

この他、単結晶薄膜を剥離して得る方法として、機械的に剥離する CLEFT (Cleavage of Lateral Epitaxial Films for Transfer) などの方法が MIT によって提案され、GaAs セルにおいて、効率 22.2% (AM1.5) が得られている。また、GaAs セルや InP セルと Si セルとの静電ボンディングや共晶合金ボンディングも検討されている。EEV では、GaAs に熱

膨張係数がマッチしたカバーガラス上に静電ボンディングにより接着した GaAs セルで、効率 15.7% (AM0) を実現している¹⁷⁾。Tampere 大学では、Au を用いた Si 基板と InP セルとの共晶ボンディング (400~450°C) の後、選択エッチングにより InP 基板を除去し、InP-on-Si セル (4 cm²) を作製し、active-area 効率 16.5% (AM1.5) を実現している¹⁸⁾。

3.2 多結晶薄膜セル

多結晶薄膜セルも、低価格の太陽電池として可能性を有する。多結晶薄膜太陽電池の効率は、基板結晶の粒径に依存する。従来、Mo、W やグラファイト上の多結晶 GaAs や InP セルの作製が試みられて来たが、多結晶層の粒径は高々 10 μm 程度で、効率 10% を超えるのは難しかった。最近、光学グレードの多結晶 Ge 基板上的 MOCVD 法によるヘテロフェイス p-on-n 1 cm² セル (図-8) で、AM1.5 効率 15.8% が達成されている¹⁹⁾。多結晶 Ge 基板の粒径が 1 cm 以上の仕様で、価格も単結晶 Ge の 1/10、将来的には 24 インチ径のキャスト Ge も育成できるとの事で、注目に値する。現状では、FF が低く、低抵抗 Ge 基板の使用により改善可能である。

4. 化合物半導体太陽電池の適用領域と応用例

4.1 宇宙用太陽電池

III-V 族化合物半導体太陽電池の用途として最有力なのが宇宙用である。化合物半導体の多くは、バンド構造が直接遷移型のため、間接遷移型の Si よりも、太陽電池特性の放射線劣化が起りにくいからである。化合物セルでは、Si に比べて、約 2 桁多い欠陥導入により、ようやく同等の放射線劣化を示すことになる。

米国の宇宙用太陽電池使用量は、年 100~120kW で

推移しており、実用化されている宇宙用 Si 太陽電池の AM0 効率は13~15%である。GaAs 太陽電池の平均効率は18.5%で、セルコストは高くとも、アレイコストでは拮抗しており、アレイ重量の軽減や衛星断面積の低減のメリットがあるとの分析結果もある²⁰⁾。ASEC は、GaAs セル 100万個以上の製造実績があり、全世界の90%以上のシェアを有する。4 × 2 cm² の MOCVD 成長 GaAs-on-Ge セルも、2000セル/週以上の生産能力があり、平均効率は18.7%である。日本でも、三菱製 LPE 成長 GaAs セル(2 × 2 cm² 実用セルの平均 AM0 効率は17.5%) が、通信衛星”CS-3 (さくら3)”用電源として実用化された²¹⁾。

InP は、GaAs よりさらに優れた放射線耐性がある。InP 中では、主要な照射欠陥が室温でも動き、さらに、光照射により、照射欠陥のアニーリングが促進され、100Kの低温度でも放射線劣化が回復するため、InP 太陽電池は優れた耐放射線損傷特性を示す。このような高効率で耐放射線特性に優れた InP 太陽電池は、放射線環境の厳しい軌道を航行する衛星への適性があり、世界に先駆けて、科学衛星”羽衣”用電源として実用化されている²²⁾。日本鉱業では、2 インチウエハが50枚処理できる拡散法による InP 太陽電池の量産システムが開発されている(2 × 1 cm² 実用セルの平均 AM0 効率は16.5%)。

今後、宇宙用薄膜太陽電池技術が進展すると考えられる。前述した各種太陽電池技術が宇宙用として、まず花開き、次いで地上用へと適用範囲が拡大することを期待している。欧米でも、GaAs や InP セルに加えて、a-Si, CuInSe₂, CdTe 薄膜セルや多接合セルなどの宇宙用新型太陽電池の宇宙実証試験が計画されており、貴重なデータ取得が期待される。

4.2 地上電力応用

三菱、住友電工が関西電力と協力して、GaAs セルを用いた 1 kW 規模の集光式太陽光発電システムの実用化試験が行われた。米国でも、GaAs 集光形セルを使った50kW の発電システムの建設例がある。

4.3 民生用への応用

AlGaAs-GaAs ヘテロフェイスセルは、動作電圧が高く、しかも変換効率が高いことから、腕時計用として実用化されている。

5. 今後の課題

GaAs や InP 太陽電池は、宇宙用太陽電池として適用されよう。さらに、適用領域を広げるには、III-

V/Si (Ge) 構造の薄膜太陽電池が当面の研究開発ターゲットである。高効率化の極限追求もなされるべきである。二接合セルで、理論的には効率36~39%が予想される。Si と化合物の薄膜タンデムセルなどは、高効率・低コストの太陽電池としての可能性を秘めていると考えられる。集光動作も、低コスト化、高効率化に有効であり、今後の研究開発が期待される。

化合物半導体太陽電池は、Si 太陽電池に比べて多くの技術課題があるが、Si 技術との融合をはかりつつ、宇宙用ばかりでなく地上用としても実用太陽電池として大いに発展することを期待したい。

参考文献

- 1) 上村税男, 山口真史: エレクトロニクス (1984年8月号) 73.
- 2) J. M. Woodall et al. : Appl. Phys. Lett. 21, 379(1972).
- 3) S. R. Kurtz et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 138.
- 4) K.W.J. Barnham et al. : Proc. 11th European PV Solar Energy Conf., Montreux, (1992).
- 5) M. Yamaguchi et al. : Proc. PVSEC-2, Beijing, (Chinese Inst. of Electron., Beijing, 1986) 573.
- 6) M. Yamaguchi et al. : J. Appl. Phys. 55, (1984) 1429.
- 7) N.R. Kaminar et al. : Proc. 20th IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1988) 766.
- 8) C. Amano, M. Yamaguchi and K. Hane : Tech. Digest of PVSEC-5, Kyoto, (Jpn. Soc. of Appl. Phys., Tokyo, 1990).
- 9) L.M. Fraas et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 190.
- 10) B.C. Chung et al. : Appl. Phys. Lett. 55, (1989) 1741.
- 11) J.M. Olson et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 27.
- 12) M.W. Wanlass et al. : Proc. 22nd IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1991) 38.
- 13) P.R. Sharps et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 14) R.K. Chiang et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 15) Y. Kadota et al. : Proc. PVSEC-4, Sydney, (1989)873.
- 16) C. Cheng et al. : Proc. 22nd IEEE PVSC, Las Vegas, (IEEE, New York, 1991) 393.
- 17) C. Hardingham et al. : Presented at the 23rd IEEE PV SC, Louisville, 1993.
- 18) J. Lammasniemi et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 19) R. Venkatasubramanian et al. : Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 20) L.W. Slifer, Jr. ; Presented at the 23rd IEEE PVSC, Louisville, 1993.
- 21) H. Takata et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 1219.
- 22) M. Yamaguchi et al. : Proc. 21st IEEE PVSC, Orlando, (IEEE, New York, 1990) 1198.

太陽電池用低コストシリコン基板製造技術の開発動向

①太陽電池用シリコン製造技術の開発動向

Trend of Production Process Development of High Purity Silicon for Solar Cell

荒谷 復 夫*

Fukuo Aratani

1. はじめに

最近、無尽蔵な太陽エネルギーを用い、その利用過程で環境汚染のない太陽電池が次世代の電力発生装置として注目されている。とくに、結晶Si型太陽電池はアモルファスSi太陽電池に比べて変換効率と信頼性が高く、すでに実用段階に入りつつある。

この結晶Si型太陽電池には、通常、比抵抗が $0.5 \sim 1.5 \Omega \cdot \text{cm}$ のp型半導体特性を持つ高純度Siが必要とされ、現在、その原料として高価な半導体用Siないしその規格外品が使用されている。このような原料事情では、太陽電池の発電コストの低減や、長期エネルギー需給見通し等で期待される巨大な発電量に見合う量の太陽電池の原料確保に限界がある。このため量産向きで安価に太陽電池用Si (SOG-Si) が製造できるプロセスの開発が急がれている。

以上からSOG-Si製造技術開発は1970年代初頭より世界各国で公的支援のもとで進められたが、未だ工業的生産技術に至っていないのが現状である。これらの開発技術は金属Siを塩化-精留-再還元する半導体用Si製造技術の改良技術と、冶金的なアプローチによる高純度Siの製造、精製技術とに大別される。前者では高品質のSiが得られるが、コスト・生産性の改善には限界があるとされており、これを解決できる技術として、最近では後者の冶金的な製造技術に開発の期待が移っている¹⁾。冶金的な製造技術での課題は純度の向上である。

本稿では、これまでのSOG-Si製造のための開発状況について概観するとともに、サンシャイン計画の一環としてNEDOの支援のもとに開発を進めてきたNEDO直接還元法とその改良法について述べる。

2. SOG-Si製造技術の目標

太陽電池では高い光電変換効率、商用電力と競争出来る安い発電コスト、セルの安定供給が重要となる。この観点から、SOG-Si製造技術には、2円/g程度のコストで1万t/年程度の生産が可能な技術が要請される。また、Si中の不純物は転位などの欠陥導入あるいは半導体特性の悪化など太陽電池の変換効率の低下の原因となるため極力低減する必要がある。これについて、Fallyら²⁾の多結晶Si基板を用いた太陽電池の変換効率に対するSi中の不純物の影響についての測定結果から、C及びO濃度については $2 \times 10^{17} \text{ atm/cm}^3$ (約2 ppmw)、その他の元素濃度については 10^{16} atm/cm^3 (約0.2 ppmw) 以下が必要と考えられる。また、B濃度は基板の比抵抗が通常 $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度に調整されるので、これに対応する濃度として $0.1 \sim 0.3 \text{ ppmw}$ が必要と考えられる。

3. これまでのSOG-Si製造技術の開発状況

SOG-Si製造技術は、太陽電池の開発が本格化した1970年代の初頭から始まり、これまでに多数のSOG-Si製造技術が提案されてきた。しかし、現状では品質、コスト、生産性の全てを満足するに至っておらず、さらに、半導体Siの規格外品で需要が充足されているため、いずれの技術も工業化には至っていない。以下に開発状況について述べる。

3.1 半導体用Si製造技術の改良

図-1に示した半導体用Siの製造法 (Siemens-C法) では、金属Siから SiHCl_3 を製造し、これを精留して不純物を除いたのちベルジャー炉で水素還元して高純度Siを得るが、 SiHCl_3 の製造時に多量の SiCl_4 が副生し、また水素還元工程での所要エネルギーが非常に大きい。この半導体Si製造プロセスを改良して、より安価にSOG-Siを製造しようとの試みは多数なされており、その主なものに(1)NEDO流動床法³⁾(2)Hemlock

* 川崎製鉄(株)技術研究本部ハイテク研究所
新素材研究センター長
〒260 千葉市中央区川崎町1

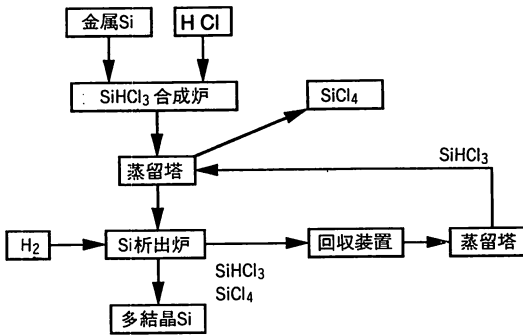


図-1 ジーメンス法の概要

Semiconductor社で開発した方法（Hemlock法）⁴⁾ (3)Union Carbide社で開発した方法（UCC法）⁹⁾がある。これらの方法では半導体用Siと同等の純度のSiが得られている。各プロセスの概要をまとめて図-2に示す。副産物のSiCl₄はSiHCl₃合成に全量循環使用するように改善されている。またシランガスの還元工程では1サイクルの処理での収率の改善、還元温度の低下、還元炉の熱効率の改善（流動床の採用）が検討された。すなわち精溜過程でのSiHCl₃の不均化を行なうことで還元工程で導入するシランガスに、SiHCl₃、SiH₂Cl₂、SiH₄を選択出来るが、不均化を進める程（SiHCl₃⇒SiH₄）還元炉の反応温度は低下でき、Siの平衡生成収率も向上、これによって還元工程での所要エネルギーが減少できる。しかし、ガスを不均化し、還元工程の合理化を進めるほど、精溜・不均化工程に循環するガ

量は増加し、設備が巨大化する矛盾があり、コスト低減にも限界がある。図-2に示すNEDO流動床法は、SiHCl₃を流動床を用いて水素還元する方法で、Hemlock法はSiHCl₃を不均化反応によってSiH₂Cl₂にし、これをH₂還元する、またUCC法はSiHCl₃を2段階の不均化反応によってSiH₄にし、これを流動床にて熱分解し、多結晶シリコンを得る。しかしながら、高純度Siの製造コストはこれらのいずれの方法を用いても、SOG-Siとしての2円/gの達成は難しいと考えられており、純度8～9-NのSiが得られることから、むしろ半導体用Si製造法とみなすべきである。

3.2 冶金的な製造技術

冶金的な原理に基づくアプローチに、金属Siを精製、高純度化する方法と金属Siを製造する原料を高純度化する方法の2つがある。これらの方法ではSOG-Si中の不純物の除去が最大の課題である。

(1)金属Siの精製

金属Siから不純物を除去する方法には、溶融Siとスラグの分配平衡を利用するスラグ処理、蒸気圧の高い元素を除去する真空処理、凝固時の偏析を利用し、不純物を結晶粒界にシリサイドとして析出させ、これを溶解除去する酸処理、および一方的凝固処理などがある。Hopkinら⁶⁾はSi中の不純物の固液間の平衡分配係数と太陽電池原料としてのSi中の許容限界濃度との関係を検討し、許容限界濃度が低いほど平衡分配係数が小さくなると報告している。したがって、Si中の不純物の除去には凝固時の偏析の利用が有力な手段となる。しかし、平衡分配係数の大きなC・Pの除去はあまり期待できず、Bも除去できない。また、他の元素についてもSOG-Si中での許容限界濃度が非常に小さいため、精製する金属Si中の不純物濃度は10ppmw程度まで下げておく必要がある。一方、スラグ処理⁷⁾ではSi中のAl、Bは低減できるが、Bではスラゲーメタル間の平衡分配比が2程度と小さく⁸⁾精製効果には限界がある。したがって、上述の方法のいくつかを組み合わせることで精製することになるが、代表的な開発例としてElkem社で開発が進められたシルサー法⁹⁾ Heliotronic社において開発された“Upgrading法”¹⁰⁾とがある。シルサー法はB、Pの濃度の低い金属SiにCaを3～4%添加して凝固させ、結晶粒界に析出するカルシウムシリサイド中に不純物元素を濃縮させる。この金属Siを5mm以下に粉碎し酸洗することでシリサイドや酸化物として析出している不純物を溶解除去する。酸洗後のSiを更に再溶解し、一方向凝固することによって残

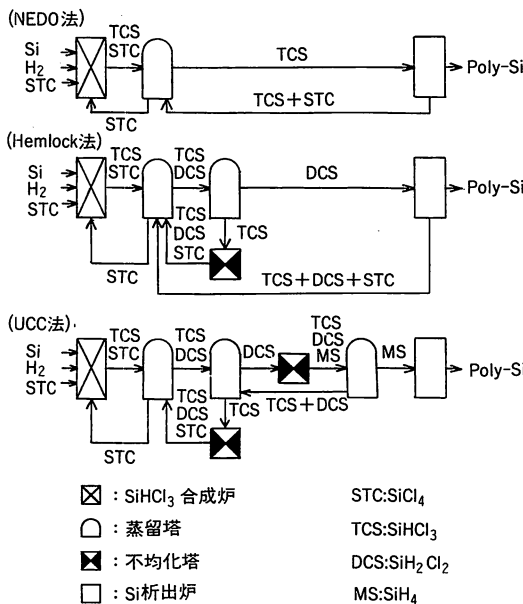


図-2 半導体Si製造法の改良プロセス概要

存するCaやSiCを除去し、SOG-Siを得る。酸洗後のSi中の不純物含有量は、B, P, C<1 ppmw, Ca<10 ppmw, Al<10ppmwであり、開発が進めばCa以外は1 ppmw以下まで精製できると報告されている。“Upgrading法”では溶融した金属SiをCaO-SiO₂系スラグと接触させ、B, C, Alを除去したのち凝固させ、粒界に析出した不純物を酸洗により除去する。次にこのSiを再溶解し、ガズブローイングないし減圧処理を行なって、Si中のO, P, Caなどを除去する。報告された結果を整理すると表1のようである。これらの方法は、SOG-Si製造としては、B, Cの除去が十分行えずさらに改善が必要と考えられる。

(2)高純度原料による高純度Si製造

高純度シリカを還元し直接SOG-Siを製造しようとする試みは、Huntら¹¹⁾によって行われた。ここでは天然産高品位珪石から製造した高純度Siを、CZ法などの一方向凝固により仕上げ精製する。しかし、原料中の不純物の大部分がSi中に移行することおよび前述したように凝固精製ではBが除去できないことから、還元炉に使用する原料(シリカ・還元剤)をあらかじめ精製することが考えられた。代表的な開発例としてACR法¹²⁾、HPS法¹³⁾、Al還元法¹⁴⁾があり、後述のNEDO直接還元法もこの1つである。

ACR法は天然珪石を溶融ガラスにした後、ファイバーに引き、酸で洗浄し、不純物を除去する。また、還元剤もカーボンブラックを酸で洗浄し、不純物を除去したものをを用いる。精製したシリカ中のB, Pは0.2 ppmw以下で、これをアーク炉で還元し高純度Siを得る。得られたSi中のB含有量は 10^{16} atms/cm³(約0.1 ppmw)で、また、Si中の炭素はSiCの沈降と一方凝固での偏析により5 ppmwまで低減される。HPS法では低Bの珪砂とカーボンブラックとからアチソン炉でSiCを製造し、この時、炉中央部から得られる高純度の部分を還元剤として用い、アーク炉で低B石英を還元して高純度Siを得る。この方法はSiCを還元剤として利用することで還元炉の発生ガス量が少なくなり、95%と高いSi歩留りが得られることである。Al還元

法では純度99.9%の珪砂をAlで還元する。Alによるシリカの還元が1,400°Cと低温で行えること、およびSi中にCが入らないという利点がある。還元後のSiはAl-Si融液として取り出され、700°C前後でAlを溶離する。残存するSi中のAlは酸洗により除去する。この方法で得たSi中の不純物含有量(ppmw)は、B<0.4, P<20, C<10, Al~1,000と報告されている。

このような高純度原料を使用する場合には還元工程でのSi歩留りが高いことが重要である。また、還元剤や炉材料から混入する不純物の除去が必要であり、仕上げ精製との組み合わせが不可欠と考えられる。

4. NEDO直接還元法とその改良技術の開発

4.1 NEDO直接還元法

NEDO直接還元法は1986年からサンシャイン計画の一環として開発されたSOG-Si製造法で、高純度原料の製造、高純度シリカの炭素熱還元および脱炭・一方向凝固によるSiの精製の3段階からなる。プロセスの概要を図-3に示す。

高純度原料の製造：シリカの炭素熱還元では原料中の不純物のほとんどが還元されてSi中に溶解する。このため原料のシリカと還元剤の純度は5-N程度、特にB含有量は0.1ppmw以下にしておく必要がある。高純度シリカ製造では、ガラス工業用の精製珪砂を水ガラス化し、この水ガラスを酸処理してシリカを析出させ、酸と純水で洗浄することで高純度シリカ粉を得る。また高純度還元剤の製造では市販のプロパンを熱分解し、乾式回収することで高純度カーボンブラックを製造、これを砂糖を結合剤としてカーボンペレットにする。これらの方法で得られた原料の分析値を表2に示す。シリカ、還元剤とも5-N以上の純度で、B濃度は0.1ppmw以下である。

高純度シリカの還元：金属Si製造用の従来のアーク炉は粉末のシリカを使用するとSiOの飛散のため収率が低い、開放型のため不純物汚染があるなどの欠点がある。このため、図-4に示す加熱したシャフトと炉下部に一對のアーク電極を持つ密閉型の還元炉を開発し

表1 “Upgrading法における原料および精製Siの不純物含有量

	B	C	Al	P	金属元素
金属Si	8	200	1400	—	—
スラグ処理後	0.4	<90	100	40	>3000
酸洗後	<0.4	—	<1	40	<10
Upgrading-Si	<0.4	<10	<1	<0.06	<0.1

表2 NEDO直接還元法で製造した原料およびSi中の不純物濃度 (ICP発光分析法)

	不 純 物 濃 度 (ppmw)					
	B	P	Al	Ti	Fe	C
高純度シリカ	<0.05	<0.2	0.8	0.5	0.5	
カーボンペレット	<0.1*	0.6*	<0.1**	<0.1*	1.8**	
還元炉 Si	<0.1	1.0	1.4	3.5	11.7	>1000***
精製後Si (太陽電池用Si)	0.1~0.2*	<0.05*	<0.01**	<0.05*	<0.01**	0.2~1.2***

*: ICP質量分析法 **: フレームレス原子吸光分析法 ***: 荷電粒子放射化分析法 ****: 燃焼法

た. この炉では高純度シリカは炉下部のアーク火点部に吹き込まれ, カーボンペレットは炉頂から装入される. 火点部で生成したSiOはシャフト部で $SiO + 2C = SiC + CO$, $SiO + SiC = 2Si + CO$ 反応により消費される. Si収率は60kg/dの還元炉で85%であり, 同規模の従来炉の60%に比べて高い. 製造したSiの分析値を表2に示した. 還元剤に炭素を使用したためSiには0.1%程度のCが残留し, その大部分はSiCとなってSi中に懸濁している. またFe, Ti, Alは炉材などからの汚染により原料と比べて多少増加するが, Bは0.1ppmw以下に収まる.

Siの精製: 上記の還元炉Si中の不純物をSOG-Si出の許容限界以下に低減するため以下のように脱炭, 精製を行う. 脱炭には, まず溶融Siを1,450~1,500℃のシリカの粒子充填層に通しSiCを口過除去する. つぎに, このSiをシリカ坩堝中で溶解, 攪拌することで溶存

炭素を除去する. 溶存炭素の除去反応は $C + O = CO(g)$ であり, 酸素はシリカ坩堝より供給される. 還元炉から得たSi中の約0.1%の炭素は口過により50~80ppmwまで減少, さらに酸化脱炭により2ppmw以下まで除去される. 脱炭後のSiは精製処理にかけられる. 精製には, Si中のFe, Ti, Alなどの金属元素の固液間の平衡分配係数が $10^{-3} \sim 10^{-6}$ と小さいことを利用して一方向凝固処理が行われる. 精製処理で得られたSOG-Siの不純物含有量を表1の最下段に示す. Fe, Ti, Alなどの金属元素は0.05ppmw以下, Bは耐火物からの汚染により0.1~0.2ppmwに増加するものの比抵抗は0.5~1.5Ωcmである.

太陽電池としての変換効率: 製造したSiの品質評価には太陽電池の変換効率測定が必要である. 上述の技術で製造した30kgのSOG-SiをNEDOの原料評価用

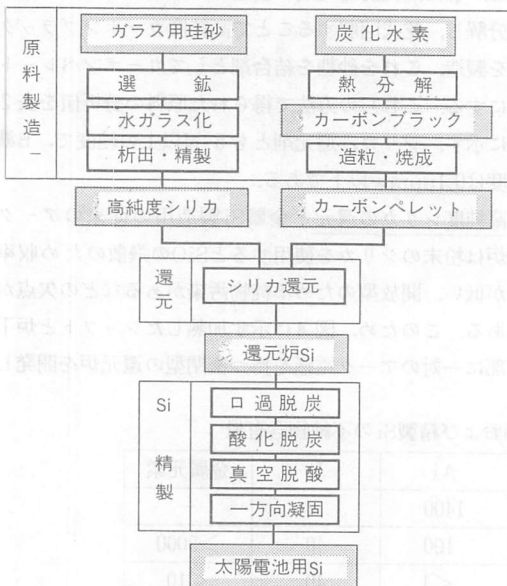


図-3 NEDO直接還元法の概要

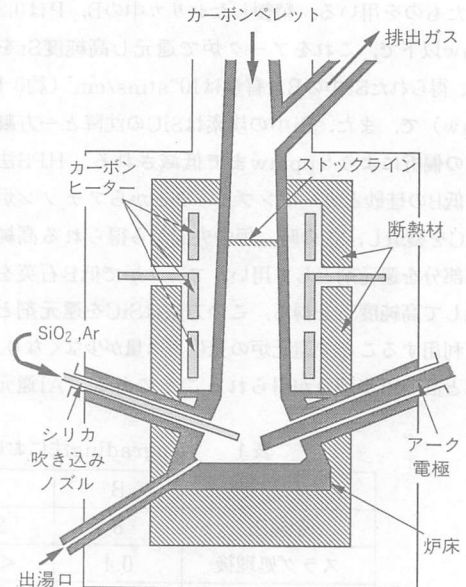


図-4 NEDO直接還元法の還元炉の概要

表3 種々の原料Siを用いた太陽電池の変換効率の比較

基板	原料Si	変換効率 (% , AM1.5, n = 9)		
		(平均)	(最高)	(最低)
キャスト法多結晶基板 (10×10cm ²)	NEDO直接還元法	12.8	13.2	12.3
	NEDO流動床法	13.0	13.2	12.8
CZ法単結晶基板 (5 cm ²)	NEDO直接還元法	16.5	16.8	16.2
	NEDO流動床法	16.3	16.5	16.0
	半導体用Si	16.8	17.0	16.5

基板・セル製造工程を通して評価したときの太陽電池の変換効率を表3に示す。ここでは比較材としてNEDO流動床法Siおよび半導体用Siを使用した太陽電池での結果も示したが、上記の開発技術によるSiを使用した太陽電池は比較材を用いた場合とほぼ同等の変換効率を得られている。

4.2 NEDO直接還元法の改良

上述のように、NEDO直接還元法では冶金的技術での課題であるSi中の不純物の除去について十分な結果が得られることが示された。この方法ではSi中から最も除去の難しいBとCのうち、Bは原料の精製で解決している。このため専用の原料精製設備と還元炉が必要となり、プロセスとして連続生産を基調とした大量生産用技術といえる。しかし、太陽電池が普及過程にある現状をみると、消費量に見合って生産調整が可能な技術への改良が必要である。このため、新たにSi中のB除去法の開発と精製の強化により市販の高純度金属Siを原料とする方法への改良を検討した。Si中のB除去では、水蒸気添加プラズマ処理を検討し、図-5の結果を得ている。一方、市販の金属Si中の不純物含有量は表4のよう表2の還元炉で得られるSiのより多量のFeなどを含むため、精製工程では2回の一方向凝固処理が必要となる。このような処理により市販の金属Siを精製した結果の一例を表4の下段に示す。またこのSOG-Siを用いた多結晶Si太陽電池の変換効率を表5に示した。上記の技術は現在まだ基礎的研究中であるが、太陽電池の普及過程での技術として有望な方法であり、さらにNEDO直接還元法に適用することで天然産の低B珪石の使用も可能になると考えられる。

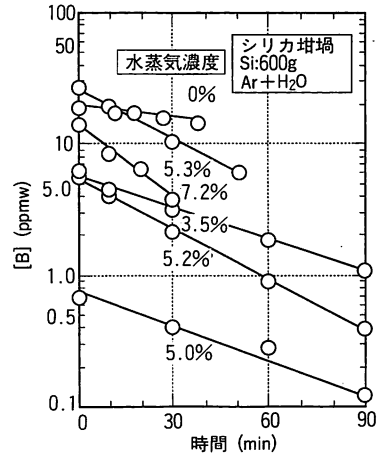


図-5 水蒸気プラズマ処理によるSiの脱B結果

表5 試作した太陽電池の変換効率 (%) (75mm²)

A	B	C
9.8	10.9	7.6

A, B, C : セル化方法

5. まとめ

SOG-Si製造技術は太陽電池の利用拡大に対して重要な開発課題であり、1970年代から多数の研究が行われて来たが、何れの技術も工業化に至っていないのが現状である。しかし、我が国では、現在NEDOの支援のもとで、NEDO直接還元法とその改良技術の開発研究が進められており、良好な結果も得られつつある。今後は早期の実用化に向けた開発技術の見極めと、工業的な生産技術とするための開発が重要となろう。

表4 金属Siと精製後のSiの分析値 (ppmw)

	B	P	Al	Ti	Fe	C
市販の金属Si	23	27	860	23	470	800
精製後のSi	0.1	<0.05	0.01	<0.002	<0.01	3

参考文献

- 1) 阪口泰彦, 他: 川鉄技報, 21 (1990), 65.
- 2) Fally, J., et al: Revue Phys. Apply., 22 (1987) 529.
- 3) NEDO ニュース: (1989) 3.
- 4) Hemlock Semiconductor Corp.: Prog. Rep., DOE/JPL 955333 (1981).
- 5) UCC Low Cost Solar Alloy Project: Prog. Rep., DOE/JPL 954334 (1980).
- 6) Hopkins, R. H., et al: Prog. Rep., DOE/JPL 954331 (1980).
- 7) Dietle, J.: Proceedings of 8th EC-PVSEC, Florence (1988) 599.
- 8) 鈴木吉哉, ほか: 日本金属学会誌 54 (1990) 168.
- 9) Schei, A.: Proceedings of Workshop on Low Cost Polysilicon for Terrestrial Photovoltaic Solar Cell Applications, Las Vegas (1985) 275.
- 10) Heliotronic-Wacker: 特開昭56—69218.
- 11) Hunt, L. P., et al: 13th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., (1987) 333.
- 12) Aulich, H. A., et al: Proceedings of 1st International PVSEC, Kobe (1984) 777.
- 13) Rustioni, M., et al: Proceedings of Workshop on Low Cost Polysilicon for Terrestrial Photovoltaic Solar Cell Applications, Las Vegas (1985) 297.
- 14) Dietle, J., et al: Proceedings of 3rd International PVSEC, Tokyo (1983) 533.

協賛行事ごあんない

「圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナー」

—圧縮空気エネルギー貯蔵発電の現状と関連技術の動向—

1. 主催 財団法人新エネルギー財団
2. 後援 通商産業省, 資源エネルギー庁
3. 期日 平成5年11月11日(木) 9:30~16:30
4. 会場 中央大学駿河台記念館 370号室
(東京都千代田区神田駿河台3-11-5,
TEL 03-3292-3111)
5. 参加費 30,000円 (テキスト代, 昼食代含む)
6. 定員 130名
7. 講演題目
 - ・最近のエネルギー情勢とその政策
……資源エネルギー庁 平野 正樹
 - ・マッキントッシュCAES-G/Tの現況
……前徳島大学教授 竹矢 一雄
 - ・CAES-G/T発電パイロットプラントの調査現況
……財新エネルギー財団 天野 国功
三村 隆
 - ・スウェーデンにおける高圧ガス地下貯蔵実験
……清水建設(株) 八田 敏行
 - ・都市ガス等地価貯蔵システムのF/Sに関する
調査・研究
……東京大学教授 小島 圭二
8. 申込・問合せ先
東京都千代田区紀尾井町3-6
(秀和紀尾井町パークビル6階)
財団法人 新エネルギー財団
エネルギー貯蔵技術本部 国西 達也
TEL 03-5275-9826, FAX 03-5275-9831

特集

太陽電池実用化の取り組み

太陽電池用低コストシリコン基板製造技術の開発動向

②太陽電池のための結晶化法と電磁鑄造法

Silicon Crystallization Methods and Electromagnetic Casting for Photovoltaics

金子 恭二郎*

Kyojiro Kaneko

1. はじめに

どのような結晶製造法が太陽電池の結晶基板製造法に適した方法であろうか。約二十年間にわたって、たくさんのアイデアと労力が、この問題に傾注されてきた。あるいは、将来も追求されるであろう。現状のシリコン結晶基板の工業生産は、溶解した原料からインゴットに結晶化して、このインゴットを板状に切断(スライシング)する方法で行なわれている。しかし、この方法ではスライシングのコスト割合がインゴット製造時と同じ程度になり、またスライシングの切り代(切断厚さ)が結晶基板厚さと同じ程度になる。

このため、つぎの考えが提案された。もし、溶解した原料を結晶化するとき、インゴットではなく、板状に結晶化させれば、スライシングは不要になり、製造法が非常に合理的になる。基板製造のコストを考えたとき、高価な半導体原料の使用量は半分になり、さらにコストの半分を占めるスライシング工程を省略できる。この方法は薄板法(シート法あるいはリボン法)、また、薄膜法として、現在の太陽電池研究の大きな一角を占めている。本文では太陽電池用結晶の製法について、インゴット法といくつかの薄板法の現状技術を比較し、また、新しいインゴット法として研究が進められている電磁鑄造法について紹介したい。

2. これまでの結晶化法の研究

結晶基板の製法を大略、分類すれば図-1のようになる¹⁾。上述したように、生産が行われている製造法はスライシングを経るインゴット法で、単結晶および多結晶がある。単結晶製法にはチョクラルスキー(CZ)法およびフロート・ゾーン(FZ)法があり、太陽電池用にはチョクラルスキー法が利用されている。単結晶

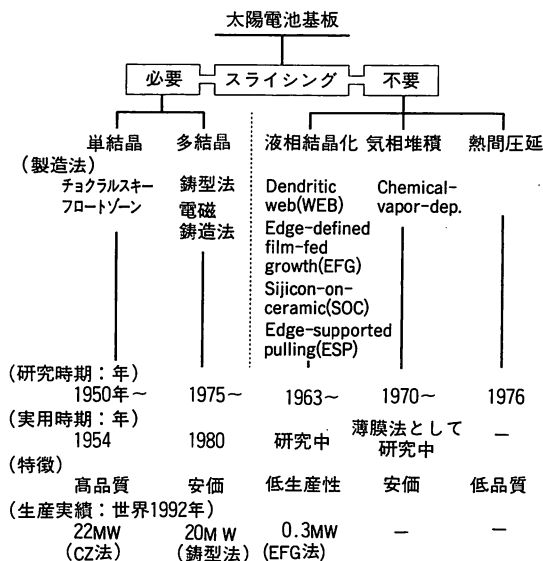


図-1 太陽電池結晶基板製造法の分類と生産実績

は電子工業の発達とともに、製法および品質とも長い歴史の中で鍛練、改良が重ねられている。多結晶は太陽電池の低コスト化という課題のために、新たに開発された材料といえる²⁾。溶解したシリコンを鑄型中で方向性凝固することによって、結晶粒径の大きな鑄塊を作ることができる。多結晶の結晶品質は単結晶ほど良質ではないが、結晶基板の低コスト性という点で大きな可能性がある。多結晶は現在、鑄型法によって生産されているが、研究中の電磁鑄造法は、後述するように、電磁場の磁気圧の浮揚力を利用してシリコンを無接触溶解する鑄型なし多結晶製造法といえる。

溶解したシリコンを薄板状に結晶化させ、これをスライシングなしで太陽電池基板にする方法は、多結晶インゴット法よりも早く研究着手された。図-2に主な液相結晶化法を説明する。WEB(Dendritic web)

*住友シックス(株)研究開発センター第3グループ長
〒600 尼崎市東浜町1

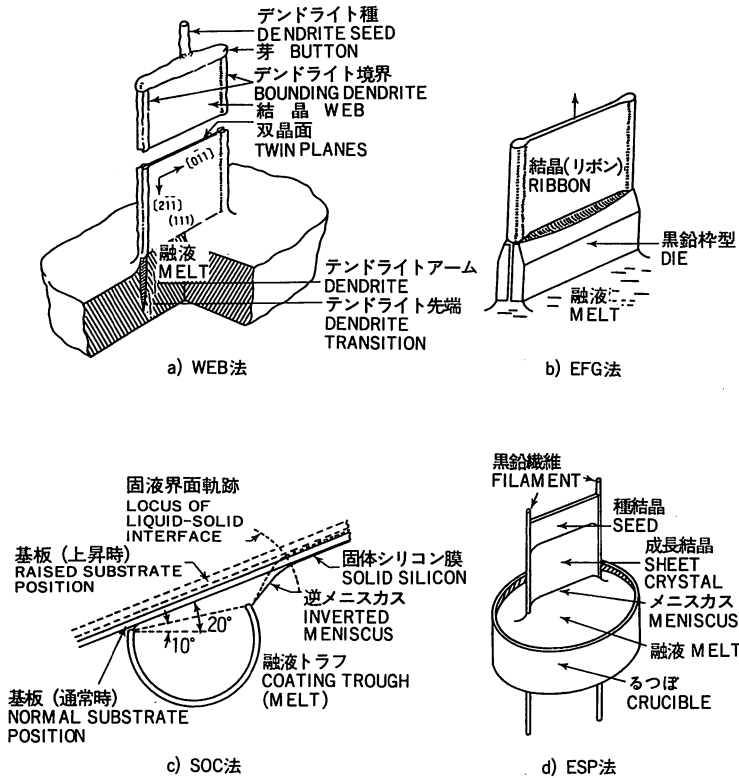


図-2 各種の液相結晶化法の比較

法はシリコンがデンドライト状に結晶成長するとき、 $\langle 112 \rangle$ 成長方向で(111)面を持って大きな結晶板を作るという観察からヒントを得ている。種結晶から引上げ法によって板状に結晶成長させ、無転位単結晶を作ることができる。結晶の幅5~6cm、厚さ100 μm 、長さ2~3mの結晶基板が作られている。EFG (Edge-defined, film-fed growth) 法はスリットをもつ枠型をシリコン融液に浸し、シリコンを毛細管現象によってスリットを上昇させながら薄い板に引上げる。スリット両端付近で成長する結晶の特性が悪いため、スリット端のない八角形のスリットが考案され³⁾、結晶の幅80cm (一辺が10cmの八角形)、厚さ300 μm 、長さ6~10mの大きな多結晶基板が作られている。SOC (Silicon on ceramic) 法はシリコン融液にセラミック基板を接触させ、セラミック基板に濡れるシリコンを薄く結晶化させていく。この方法では厚さ約100 μm の多結晶の薄膜がセラミック基板上にコーティングされ、結晶の面積成長速度を大きくとれる特徴がある。ESP (Edge-supported pulling) 法はWEB法の結晶成長時の結晶両端の不安定性を、黒鉛繊維を

供給して固定する。幅6cm、厚さ300 μm の多結晶が引上げられている。

薄板結晶化法は他にも多くの考案が提案されているが¹⁾、基本的には上述した考え方の応用に含まれる。実験室的な薄板結晶製造の実績は、上で見たように、結晶の大きさや凝固速度の点で工業化可能なレベルまで達しているように見える。しかし、ほとんど実用化されていない。これについては、結晶品質に関する問題を吟味する必要がある。

3. 各結晶化法の結晶特性

太陽電池基板の結晶製造時の条件と結晶特性の基本的な関係を図-3に説明した。結晶の太陽電池特性は少数担体のライフタイムによって決まる。高いライフタイムは結晶中の欠陥と不純物を少なくすることによって得られる。多結晶では粒界も欠陥になるため、結晶粒径を約1mm以上に大きくして粒界の影響を小さくする。結晶製造時には結晶に付与する温度勾配と凝固速度を制御することができる。この与えられた条件下で、凝固進行とともに結晶内に温度勾配と熱応力が生

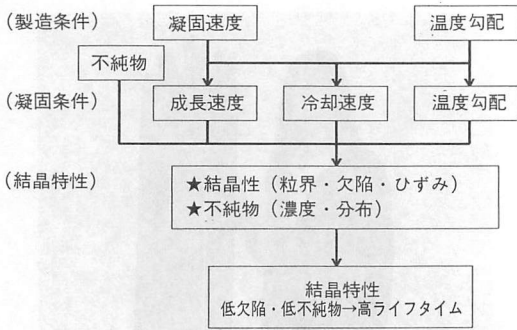


図-3 結晶成長条件と結晶特性の関係

じ、冷却速度と関係する結晶中の不純物の移動が関与しながら、結晶中に種々の欠陥が発生する。一方、単結晶は無転位化されるので、微量の不純物が結晶特性に影響を与える。

現状の結晶について実用化されているもの、および研究段階のもの、両方について結晶成長条件および結晶品質を比較して表1に示した。実用化されているショックラスキー法単結晶が品質において卓越していることがわかる。もう一つの実用化されている鋳型法多結晶は、太陽電池の変換効率で単結晶の80%以上の値を確保している。電磁鋳造法が多結晶は、後述するように、鋳型法多結晶とほぼ同等の品質が得られている。しかし、液相結晶化法(リボン法)の結晶品質は実用化には十分とはいえない。リボン引上げ法においては、大きな温度勾配によって結晶中に大きな熱応力が生じ、結晶欠陥が発生しやすくなっている。鋳型法によって製造された多結晶中には $10^4 \sim 10^5$ 個/cm²のエッチ・ピット密度が観察されるが、リボン法が多結晶中には 10^6 個/cm²に達する場合がある。

リボン法の実用化の問題は低い生産性にある。鋳型法が多結晶製造においては100kg重量の大きな鋳塊が

表1 各結晶成長法の結晶成長条件と結晶特性

結晶成長条件	リボン引上法★ 多結晶	鋳型法 多結晶	電磁鋳造 多結晶	CZ・FZ法 多結晶
成長速度 [cm/min]	1~2	0.1~0.2	0.2~0.3	0.2~0.4
温度勾配 [°C/cm]	100~200	20~30	30~40	50~150
冷却速度 [°C/min]	100~400	2~6	6~12	10~60
ライフタイム [μs]	10~20	20~30	15~20	100~1000
変換効率 [%]	11~13	13~15	13~14	16~18

★液相結晶化法のWEB, EFG, ESP法などはリボン引上法ともいう。

製造できるのに比べて、リボン法では薄板で生産するために時間当たりの結晶生産量が少ない。リボン法の生産速度を大きくするためには、結晶にさらに大きな温度勾配を付与して、抜熱量を大きくして結晶成長速度を速めなければならない。

4. 電磁鋳造法の概要

従来のシリコン多結晶製造法はつば、あるいは鋳型中でシリコンを溶解し、この熔融シリコンを一方向凝固する鋳造法によって行われてきた²⁾。これらの鋳造法では溶解用容器に高純度な石英や黒鉛を用い、凝固するときのシリコンと容器壁の融着を防ぐために、容器壁に緩衝材として高純度なフラックスをコーティングさせている。電磁鋳造法では、こうした鋳型やフラックスなどの使用を省くことができ、生産速度も大きくできる可能性がある。

電磁鋳造法の原理を図-4に示す。この溶解法は高融点金属の溶解法として考案され、長い間その応用技術が研究されてきた⁴⁾。最初の太陽電池シリコン鋳造法の研究は米国・エネルギー省の研究プロジェクトで行われた⁵⁾。誘導コイル内にある水冷された銅のつばを長さ方向に分割すると、るつばの各分割部分には電流がループを作って流れる。分割銅のつばの内面に流れる電流はるつば内に磁界を作り、るつば内にある金属

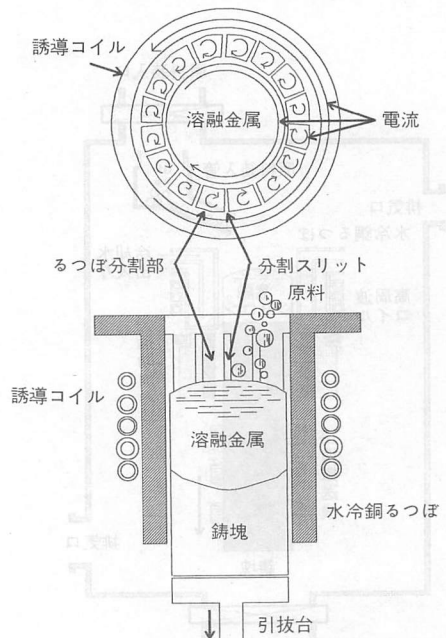


図-4 電磁鋳造法の原理とシリコン鋳造法

の表面に電流を誘導する。金属表面の電流はジュール発熱して金属を加熱すると同時に、るつぼ内面の電流がつくる磁界と作用して、溶融金属を内側に押し、すなわちピンチ力を生じる。溶融金属はピンチ力を受けて、るつぼ壁とは無接触に保持される。

この金属溶解法を利用すれば、つぎのような溶解法を可能にすることができる。

- 1) 一つの冷却のつぼ中で金属の溶解および凝固を同時に連続的に行うことができる(連続溶解・ casting)。
- 2) 浮上無接触溶解されるので溶融金属は溶解用容器から汚染されない(無汚染溶解)。
- 3) 溶解用容器の消耗がない(無消耗のつぼ溶解=無鑄型溶解)。

この溶解法を半導体シリコン溶解法に用いる場合、不純物汚染がなく、容器の消耗がないことが魅力であるが、結晶品質の制御や装置の大型化が課題である。

シリコン電磁鑄造装置の概要を図-5に示す⁹⁾。温度に対して構造敏感な半導体の性質を制御するため、また、約550℃以下で脆性破壊するシリコンを徐冷するために、水冷銅のつぼの下に鑄塊温度を制御する補助加熱装置を取り付けた。炉内は真空排気後に、アルゴンガスの1気圧下で溶解される。シリコンは常温では電気抵抗値が高いため、室温から直接誘導加熱することができない。このため、黒鉛などのブロックを補助加熱して、その輻射熱によってシリコンを昇温する。

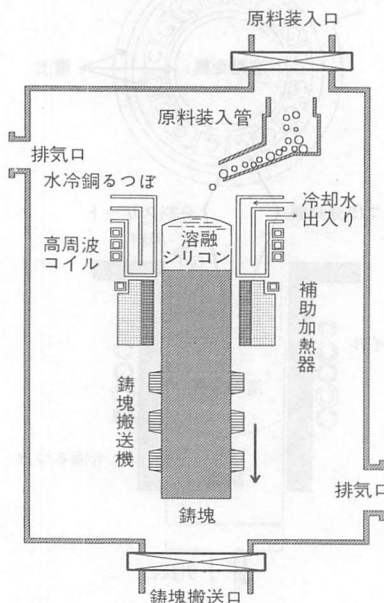


図-5 シリコン電磁鑄造装置の概要



(鑄塊断面の大きさ220×220mm)

図-6 電磁鑄造法によって作られたシリコン鑄塊

シリコンは600℃程度まで加熱されれば、通常の誘導周波数で誘導発熱する。シリコンの溶解が誘導溶解によって定常的になれば、原料シリコンを連続的に装入しながら、鑄塊を連続的に引き抜く。

現在まで断面の大きさ220mm正方形の鑄塊が試作された。鑄造した鑄塊を図-6に示す。定常運転時の溶解・鑄造に必要な消費電力を表2に示す。220mm鑄塊の連続鑄造ではシリコンプールが20kg形成され、電力は230kWが電源出力に、熱量測定によれば164kWが誘導コイル-冷却銅のつぼ-溶解シリコン系に消費された。

5. 電磁鑄造結晶の性質

半導体結晶の特性は結晶欠陥と不純物の挙動によって決定される。しかし、電磁鑄造された結晶中の不純物の影響を調査することは、大変に難しい。半導体シリコン原料を使用して鑄造したときには、原料および

表2 電磁鑄造法の大型化におけるシリコン鑄塊の大きさと電力所要量

鑄塊断面 [mm]	溶解量 [kg]	電源出力 [kW]	コイル出力 [kW]	研究期間 [年]
88 x 88	1.8	62	34	1988~90
118 x 118	3.6	65	58	1989~90
170 x 170	7.0	120	104	1990~92
220 x 220	20	230	164	1991~

鋳塊中の不純物濃度は通常、分析限度値以下になっている。シリコン中の不純物は溶液が凝固するときに、偏析効果によって鋳塊中では原料中の濃度よりも低い濃度になるため、不純物分析はさらに困難になる。

偏析効果は、一方、半導体シリコンの高純度化のために、ゾーンメルト法⁷⁾として利用されてきた。電磁鋳造法においても偏析による不純物除去の効果は大きく、ゾーンメルト法と同じ偏析現象が適用される。電磁鋳造による不純物偏析について、不純物の分析が可能な金属シリコン（純度～99%）を原料として用いた実験結果を図-7に示す。原料中不純物濃度（図中初期濃度）に比べて、ボロン、りんなど、偏析係数が1に近い元素は鋳塊中でもあまり原料中濃度と変わらない。しかし偏析係数の小さい鉄、ニッケル、チタン、クロムなどは鋳塊中で1/1000以下の濃度まで純化されている。この結果から類推して、半導体シリコン原料を使用した電磁鋳造においても、偏析効果によって鋳塊の不純物濃度はかなり低減されていると考えられる。

濃度勾配および冷却速度が結晶特性とどのような関係にあるかについて、電磁鋳造時の鋳塊温度測定と鋳塊の結晶評価を行って調査した。凝固中に鋳塊に付与された温度勾配に対して、生成した結晶の太陽電池の変換効率を図-8に示した。同図での温度勾配は、鋳塊温度が1000℃以上の領域にあるときの値がとられている。これらの凝固熱履歴をもった鋳塊について結晶粒内のエッチピット密度を測定し、各鋳塊のエッチピット密度と電池変換効率の関係をプロットしたものを図-9に示した。これらの結果は、結晶が高い温度領域下

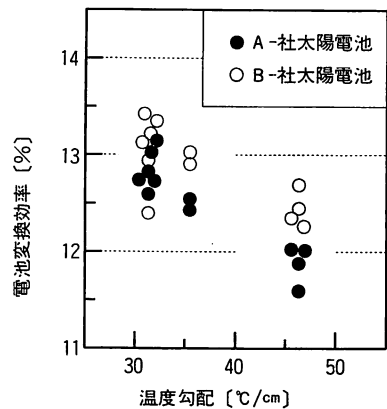


図-8 鋳造温度勾配に対する鋳塊の電池変換効率

で大きな温度勾配を受けることによって欠陥を発生していることを示唆している。

電磁鋳造法で試作された結晶の太陽電池変換効率を図-10に示す。変換率は鋳塊の大型化においても13～14%が保持され、実用化可能な品質が確保されている。電磁鋳造法において実用化のために残された課題は、大型鋳塊の安定した溶解・凝固方法の確立、凝固の高速化および結晶品質の向上などであるが、いずれの課題も基本的に解決可能なものと考えられる。

以上、太陽電池用結晶製造法の概要を述べた。しかし、今後のさらなる太陽電池の普及のためには、未だに優れた結晶製造法が確立されたとはいえない。また、結晶基板製造は太陽電池製作技術のなかの一つの工程であるため、今後の進歩による太陽電池の種類や構造

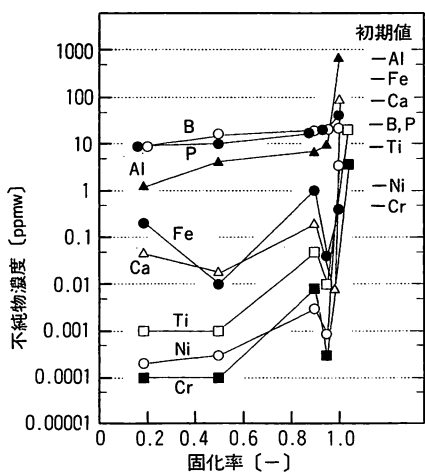


図-7 電磁鋳造シリコン鋳塊中の偏析効果による不純物の除去（溶解原料；金属シリコン，純度～99%）

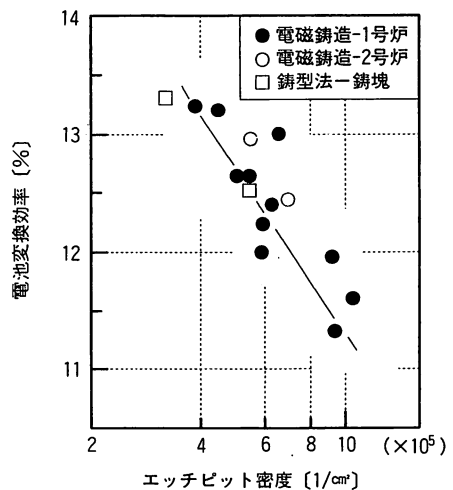


図-9 鋳造結晶のエッチピット密度と電池変換効率の関係

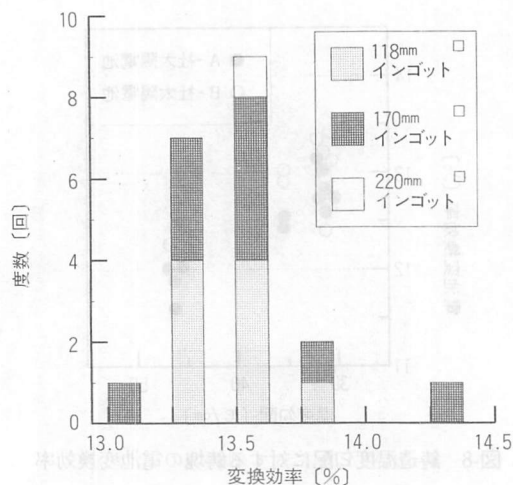


図-10 電磁铸造多結晶の電池変換効率
(118, 170, 220mm 铸塊)

の変化に関係して、結晶基板の材料および製造法が変わることもありえる。現在の主流を占めるシリコン結晶系の太陽電池技術の進歩が期待されるとともに、他の太陽電池技術の革新的な進展も期待される。

本件研究は通商産業省工業技術院サンシャイン計画の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構

の委託によって行われました。ここに関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 太陽電池用結晶および製造法のレビューとして, J. Dietl, D. Helmreich and E. Sirtl; "Solar Silicon" in Crystals Vol. 5, Ed. J. Grabmaier (Springer, Berlin, 1981), pp. 43-108. または, T. F. Cizsek; "Techniques for the Crystal Growth of Silicon Ingot and Ribbons" J. Cryst. Growth 66 (1984), pp. 655-672.
- 2) 金子恭二郎, 増田淳也, 田端一喜; 「铸造法による太陽電池用シリコンの製造」日本金属学会会報, 28巻8号(1989), pp. 664-671.
- 3) F. V. Wald; "EFG Crystal Growth Technology for Low Cost Terrestrial Photovoltaics" Technical Digest of the International PVSEC-5, Kyoto, 1990, pp. 191-196.
- 4) 金子恭二郎; 「冷却るつぽ法による半導体シリコンの製造」溶融塩, 35巻2号(1992), pp. 95-109.
- 5) T. F. Cizsek; "Some Applications of Cold Crucible Technology for Silicon Photovoltaic Material Preparation" J. Electrochemical Soc. 132 (1985), pp. 963-968.
- 6) 金子恭二郎, 三沢輝起, 増田淳也; 「コールドクルーシブルによる太陽電池用Si結晶の製造」日本金属学会会報, 29巻4号(1990), pp. 247-249.
- 7) W. G. Pfann; "Principles of Zone-Melting" Trans. AIME. 194 (1952), pp. 747-753.

協賛行事ごあんない

新エネルギー技術・超高温材料(VII)合同シンポジウム

「21世紀へ向けた新エネルギー技術」開催案内

<開催日> 平成5年11月16日(火)・17日(水)

<会場> ときわ湖水ホール(宇部市)

<詳細問い合わせ先>

〒755 山口県宇部市常盤台2557

山口大学工学部内

新エネルギー技術・超高温材料VII

合同シンポジウム事務局 安本

TEL 0836-31-5100 (内 2232)

■ 事務連絡先

(株)超高温材料研究センター 山口センター
技術部 宮村 紘

〒755 山口県宇部市大学沖宇部573-3

TEL 0836-51-7160

FAX 0836-51-7165

特集

太陽電池実用化の取り組み

太陽光発電システムの系統連系制御技術

Utility Interconnection Technology for Private PV Generators

滝川 清*

Kiyoshi Takigawa

1. はじめに

太陽光発電は燃料不要で排気、廃熱など環境汚染の心配がなく、しかもモジュラリティに優れ短期間に建設できるため、今後のエネルギー問題や環境問題解決の一端を担う新エネルギーシステムとして期待されている。

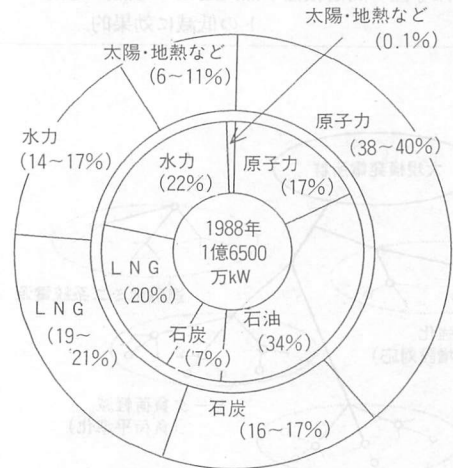
我国における光発電システムの研究は1974年にスタートしたサンシャイン計画に基づいて進められ、NEDOを中心に、これまで太陽電池、蓄電池、インバータなどの要素技術をはじめ、各種応用分野を指向したシステム化技術、その他、システム最適設計のための周辺技術の研究が精力的に進められてきた。

これにより、最近では国際的にも一流の技術水準に到達し、既に実用化の領域に入りつつあるが、今後さらに性能の向上を通じてコストの壁を乗り越えるべく、新しいフェーズの研究が鋭意進められている。

2. 太陽光発電システム実用化の環境

我国の21世紀中庸に至るエネルギー需要予測では、経済成長率を2.5%程度と見積もった場合、今後の省エネ努力によるが、2050年には現在の1.4~2.2倍、石油換算で年間6~9億トンのエネルギーが必要になるものと見込まれている。

このうち、電力需要はエネルギー媒体としてのクリーン性と利便性を買われて現在の2~3倍に達するため、2050年には図-1に示すとおり、2億6千万kWから最大3億7千万kWの発電設備が必要になるものと見られている。これに対処するためには、電気事業としても電源構成、電力輸送システム等に新しい技術を取入れて行く必要があり、太陽光発電は在来型発電を補完する有力な技術として、地熱発電等とともに将来の電



2050年の電源構成 (2億6000~3億7000万kW)

図-1 今後必要となる電源構成の推移 (予測)

源構成の6~11%を担うことが期待されている。

特に電力輸送に関しては、図-2に示すように、これまでの集中配置形の電源形態から一歩踏み出し、新たに自然エネルギーシステムをはじめ、燃料電池や電力貯蔵システムを組み合わせた需要地域内分散電源システムの構想が検討されている。

すなわち電源構成を従来の集中形から分散形にシフトすることにより、需要地域内配電系自体の供給力、信頼性、および電力品質を向上し、ピーク負荷の軽減、負荷平準化を図ることで、大規模電源への依存度と送電コストの低減を図ることが考えられている。

米国PG&Eの開発戦略では、現在初期応用として各種小型標識灯、機器操作電源などに適用されている光発電技術を、徐々に需要地域内の小型住宅用システムや遠隔地ミニ系統電源等へシフトして行き、ピーク負荷対応の中規模電源を経て最終的に大規模系統電源としての技術に育てて行くことが考えられている。

現状では光発電の発電コストはまだ高き、直接

* 財団法人電力中央研究所 柏江研究所電力システム部
パワーエレクトロニクスグループ研究主幹
〒201 東京都柏江市岩戸北2-11-1

電気事業から見た光発電の長所

- ①環境適合性 : 排気、廃熱など環境汚染の心配がない。
- ②燃料や冷却水が不要 : エネルギー資源保全、立地上的の問題がない。
- ③モジュラリティー : スケールメリットに依存せず、あらゆる規模に対応。
- ④短期の建設期間 : 需要増加に素早く対応可能。
- ⑤負荷パターン適合性 : ピーク負荷軽減、供給予備力の低減に効果的。
- ⑥無保守性・高信頼性 : 無人運転が可能、運転コストの低減に効果的。

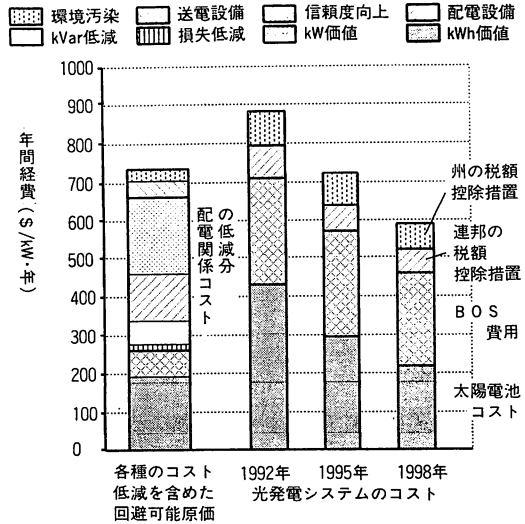


図-3 光発電システムのメリット評価 (PG&E)

太陽光発電も風力やバイオマスに次ぐ低コストの自然エネルギー源として期待されている。

3. 系統連系上の技術課題と対策

太陽エネルギーは密度が低く不安定な欠点があるが、資源の乏しい我が国では貴重な再生可能エネルギーの一つである。米国では大規模系統電源としての実用化が期待されているが、我国では国土的な制約が大きいため、図-4に示すように、光発電装置と商用電源を組み合わせることで安定した電力を供給できるようにし、将来、一般家庭用の補助電源として有効に活用することが考えられている。

3.1 系統連系に必要な諸条件

昭和61年度から平成3年度にかけて、神戸：六甲アイランドで小型光発電装置を系統連系するために必要な諸技術の実証研究が行われた。これはNEDOの研究委託に基づき、当所と関西電力が共同で実施したものである。

多数の個人用発電装置を配電線に連系する際の問題点には、性能劣悪な発電装置による配電線電力品質の劣化や配電線保護システムの信頼性低下、その他、配電線作業時の逆電圧の危険性等が挙げられる。これらの問題点を避けるため、配電線に連系する発電装置は次の基本条件を満たす必要がある。

- ①電力品質条件 : 配電線の電力品質や安定性を低下させないこと。
- ②安全性条件 : 配電線の安全性を脅かさないこと。
- ③自己保護条件 : 配電線の事故や異常電圧等から光

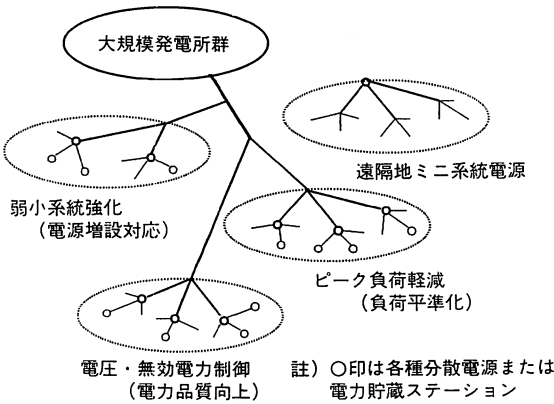


図-2 将来の分散型電力系統の概念 (PG&E)

コストの比較だけでは在来型電源に到底太刀打ちできない。しかしながら、PG&Eでは図-3に示すように、送配電コストの低減効果や環境対策に必要なコストが不要である点などを考慮すれば、1990年代中盤には十分に採算に合うようになると評価している。

光発電に競合する自然エネルギー・システムには様々な形態があるが、表1に米国EPRIが試算した各種自然エネルギー・システムのコスト見通しを示す。これによると2000年代に期待できる各種自然エネルギー・システムの発電コストは4～6セント/kWh程度で、

表1 今後の新エネルギー・コストの動向予測 (EPRI) (¢/kWh)

エネルギー源	現状	90年代中期	2000年以降
(1)光 発 電	30~40	10~20	6
(2)風 力	7~ 9	5	3.5
(3)バイオマス	5	5	4
(4)太 陽 熱	10	8	6~8
(5)地 熱	5~ 7	5~ 7	≤6

系統連系タイプ小型光発電装置

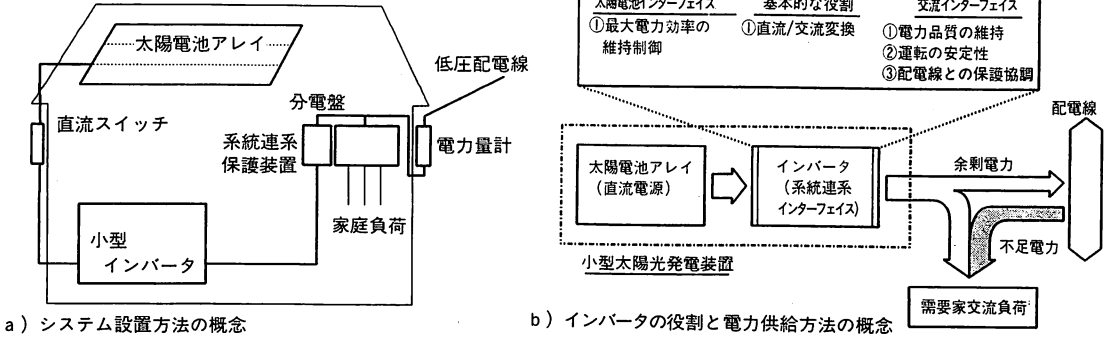


図-4 系統連系タイプ小型光発電装置の構成

表 2 系統連系仕様と装置設計における対応策

系統連系仕様条件	装置設計における対応策
<p>1. 電力品質への要求条件</p> <p>(1) 電圧変動範囲 101V ± 6 V 以内</p> <p>(2) 出力力率範囲 ±0.95 (1/8出力以上)</p> <p>(3) 高調波許容範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> ○電流総合歪み 5%, 各次 3%以下 (電圧歪み率: 増分 1%以下) ○不要電磁輻射 40dBμ以下 	<ul style="list-style-type: none"> ○系統電圧追従, 必要により無効電力制御 ○力率 1 制御 ○正弦波 PWM, 高周波化 ○直列挿入フィルタ ○歪み電流波形のフィードバック補正 ○シールドの徹底, 高周波ノイズフィルタ
<p>2. 運転特性への要求条件</p> <p>(1) 出力の安定化</p> <ul style="list-style-type: none"> ○瞬時過電流の抑制 定格電流換算 150%, 0.5 秒以下 ○ソフト起動/停止 ○低出力時の装置分離 <p>(2) 過剰応答の防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ○安定運転範囲 周波数範囲 60Hz ± 1% 電圧 範囲 101V ± 10% ○0.5秒以下の系統変動に不感 	<ul style="list-style-type: none"> ○リアクトル類の小形化, 自己励磁後に連系 ○高速過電流制限機能 ○制御ループの単純化 ○約 1~10秒のソフト起動/停止 ○太陽電池出力監視による自動起動/停止 ○トランス比, PWM 振幅比等, 主回路設計の適正化, 制御回路設計の適正化 ○主回路および保護回路時限設計の適正化
<p>3. 保護協調特性への要求条件</p> <p>(1) 装置内部事故対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ○内部事故検出条件 (0.5以下) 交流過電流検出 150% 以下 交流地絡検出 30mA以下 ○事故電流遮断能力 2.5kA ○直流分漏洩防止 <p>(2) 配電線異常時対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ○配電線異常検出条件 (0.5~ 1秒) 過不足電圧 101V ± 10% 周波数異常 50 (60)Hz ± 1% ○停電時連系運転の禁止 <p>(3) 逆充電運転の防止</p> <p>(4) 異常電圧保護 5 kV, 1.2×50 μs</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○電子回路で高速検出, パルス停止, トリップ ○漏電遮断器で検出, トリップ遮断 ○適正容量の漏電遮断器でトリップ遮断 ○絶縁トランス内蔵 ○直流分検出回路 ○電子回路で検出, 内蔵コンタクトを開放, 待機 ○制御電源を配電線から供給 (停電時停止) ○周波数発散方式 その他 ○アレスタ, ZNR 等で対処
<p>4. 作業時安全性への要求条件</p> <p>(1) 装置の分離</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○光発電装置の外部に開閉器を設置

発電装置自身を保護すること。

光発電システムでは、先の図-4に示したインバータが直流電力を交流に変換する基本機能を果たすほか、系統連系保護装置と協力して電力品質の維持、安全性の確保など、太陽電池を配電線に連系する上で重要なインターフェースの役割を果たす。

六甲アイランドでは予め表2に示す系統連系仕様をとりまとめ、これに沿う小型光発電用インバータを開発するとともに、信頼性の高い保護方式の研究を進めてきた。これは配電線に連系する個人用の発電装置が満足すべき諸条件と、これらを満足するために適用してきた諸技術を比較・対照したものである。

この結果、上の3条件をほぼ満足できることが実証されており、細部を除き、表2の大筋は本年3月に公布された系統連系ガイドラインに反映された。

3.2 小型光発電用インバータの電力品質性能

最近、NEDOで開発された小型光発電用インバータの基本性能を表3の(1)と図-5に示す。電力変換効率は90%を軽く越え、力率、電流歪み率ともに優秀な性能を示している。特に電流歪み率については図-6に示すとおり、家電製品と比べても全く問題にならない領域に達している。

表3には海外で市販されている光発電用インバータの性能も合わせて示したが、日本製品の性能は実用化の進んでいる欧米製品と比べても全く遜色はない。一方、海外製品の中には性能的に日本のガイドラインに適合できないものもあり、また、周波数、配電線電圧等の違いによる問題は残る。しかしながら、当所の赤城試験センターで詳細に性能試験した結果では、優れた欧米製品を輸入することにより、電力品質に関する

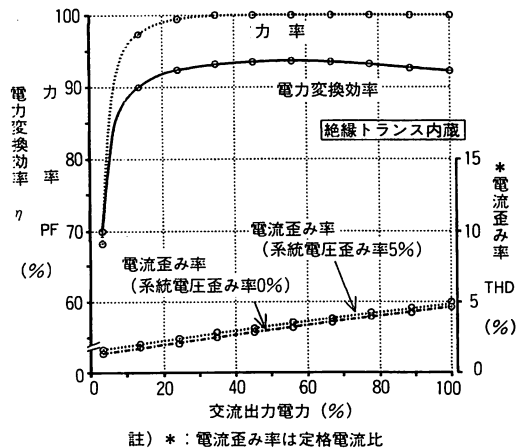


図-5 東芝 3kW高周波インバータの定常特性

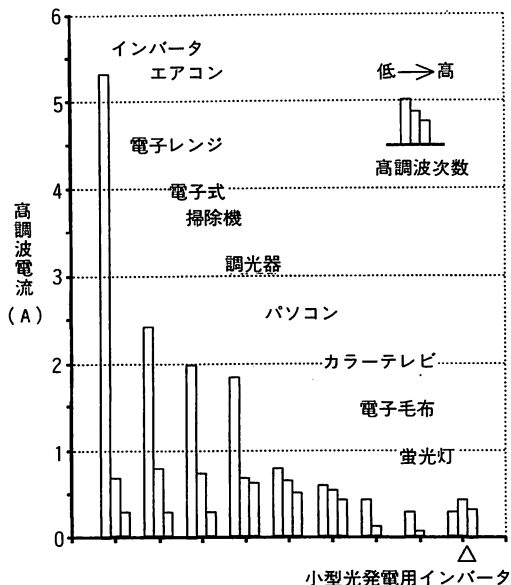


図-6 家電製品と小型光発電用インバータの高周波電流発生状況の比較

限り、国内でも十分に使用可能である。

3.3 小型光発電用インバータの系統連系保護性能

(1)一般性能

表2に示した系統連系仕様に沿って設計されている限り、地絡、短絡など装置内部の故障をはじめ、通常の配電線事故等に対する保護性能には、これま

表3 国内外各種インバータの性能比較(平成4年度)

系統連系：蓄電池なし、絶縁トランス内蔵						
製造業者	THD (%)	PF	η _{cv} (%)	η _{pt} (%)	Ltr (W)	I _{rp} (%)
①東芝 3kW	4.6	1.00	92.2	99.7	21.5	7.3
(2) 海外製品 (市販品)						
(1) 系統連系：蓄電池なし、絶縁トランス内蔵						
製造業者	THD (%)	PF	η _{cv} (%)	η _{pt} (%)	Ltr (W)	I _{rp} (%)
①SMA 1.8kW	27.3	0.96	87.1	97.2	28.8	8.5
②SUNSET 2.2kW	19.9	0.98	84.4	95.2	29.1	5.8
③MSE* 1.0kW	2.1	1.00	63.9	81.1	—	24.6
④ABACUS 5.0KW	2.7	1.00	87.4	97.8	97.6	4.3
(2) 独立電源用：蓄電池あり、絶縁トランス内蔵						
製造業者	THD (%)	PF	η _{cv} (%)	η _{pt} (%)	Ltr (W)	I _{rp} (%)
⑤GEC 2.0kW	8.4	1.00	88.2	—	32.6	19.6

(註) THD：電流歪み率(定格電流比) PF：力率
 η_{cv}：変換効率(定格出力)
 η_{pt}：最大電力追従効率(定格出力)
 Ltr：無負荷損失 I_{rp}：直流電流リプル
 *：試験中に破壊、修理後に再試験を予定

で特に問題とすべき点は見出されていない。

例えば配電線側に短絡事故が起こっても、インバータから流出する短絡電流は150%を越えることがなく、しかも半サイクル以内に制限されることが確認されている。これは回転機型発電機と大いに異なる点で、これら六甲アイランドの成果をもとに、新しいガイドラインでは保護リレー要素が大幅に簡略化された。

(2)逆充電運転現象

多数の光発電装置を含む配電線が作業停電、事故、その他、何等かの要因で主系統から切離された時に、発電装置群の出力と配電線負荷の消費電力が釣合っていると、図-7の□印に示すように、光発電装置群が配電線負荷を背負い配電線に充電した状態で運転を継続する。この現象を逆充電運転（単独運転）と言う。

逆充電運転は分散電源群の発電出力と配電線負荷の消費電力が有効電力、無効電力の両面で釣合っていると発生し易いが、この釣合い状態は配電線が主系統から切離された時、一部の電源または負荷が脱落した後で発生することもある。

また、このような現象は配電線の一部の区間だけ、あるいは互いに離れた複数の区間で発生することもある。このように配電線の中で逆充電運転が島状に持続する状態を特にアイランディング現象と呼ぶ。

逆充電運転現象は配電線作業者に危険を及ぼすだけでなく、再閉路時に、逆充電運転中の線路と主系統との電圧位相差による大きな過電流を発生するなど、配電線機器や負荷機器に対して悪影響を与える。

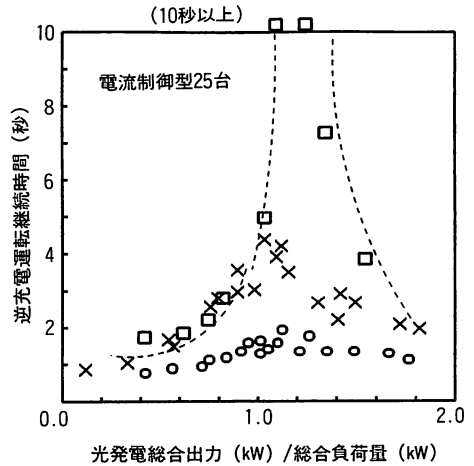
この現象は、電力会社側から制御できない多数の小型分散電源が配電線に接続されている場合に特に問題となる。これに対し、規模の大きいコジェネ・システム等では直接または間接的な停止手段が義務付けられているため、比較的問題は少ない。

しかしながら、光発電装置など多数の小規模需要家に導入される小型分散電源では、電力会社側から停止させる手段を講じることは難しいので、これらの電源側で逆充電運転状態を確実に検出し、自律的に停止する能力を持つことが必要である。

実のところ、六甲アイランドにおける研究期間の大半は、この危険な逆充電運転を防止するための研究に費やされたと言っても過言ではない。

(3)逆充電運転の防止

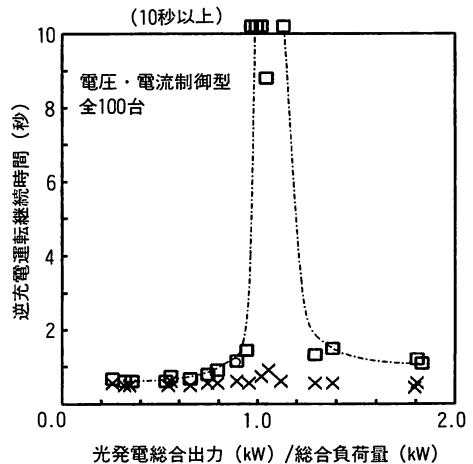
これまでに開発されている逆充電運転防止対策と



凡例

- : 電圧・周波数異常検出のみ
- × : 周波数シフト方式を併用
- : 周波数シフトと3次高調波急変検出方式を併用

a) 受動方式と能動方式を組合わせた例



凡例

- : 電圧・電流制御型全100台異常検出のみ
- × : 位相急変と3次高調波急変検出を併用

註)・静止型(LCR)負荷と回転機(MG)負荷を並列運転
・無効電力は平衡状態

b) 受動方式のみ2方式を組合わせた例

図-7 単独運転（逆充電運転）防止方式の検証試験結果（六甲）（組み合わせ方式）

その結果の概要を表4～表5に比較して示す。これらは一部を除き、いずれも六甲アイランドで実証・確認された結果である。防止対策には大きく分けて光発電装置側の対策と配電線側の対策がある。

装置側の対策としては、

- ①方式的な対策：電流制御型インバータの採用。

表4 各種単独運転（逆充電運転）防止対策の概要（分散電源側の対策）

対策方式	内容の概略	評価	備考
1. インバータ方式による対策 (1)電流制御型インバータ	○定電流源とし、電圧を維持する機能を持たせない。	◎	逆充電運転の発生条件を局限化する。
2. 受動的な対策 (1)電圧・周波数監視方式	○配電線の電圧、周波数の上・下限を監視する。	○	発電量/負荷の平衡点近傍では不可。但し逆充電運転発生条件の局限化に不可欠。
(2)位相監視方式	①配電線電圧の位相急変 $\Delta\phi$ を検出する。 ②インバータ出力電圧と出力電流の位相急変 $\Delta\theta$ を検出する。	◎ △	◎ 発電量/負荷の完全平衡時は不可。但し実質的な動作不能領域は極めて狭い。 △ 低出力時の安定な検出が困難である。
(3)高調波監視方式	①主として配電線負荷から発生する高調波電圧 ΔTHD を検出する。 ②主として電流制御型インバータと組み合わせ、インバータ、トランス、インダクタンス負荷等から発生する第3次高調波成分 $\Delta h3$ の急増を検出する。	△ ◎	△ 配電線負荷の状況に左右され易く、効果は不安定である。 ◎ 低圧単相系では極めて有効である。但し3相系で電圧源タイプのインバータを用いた場合の効果は不安定である。
(4)周波数急変検出方式	○逆充電運転時の Δf の急変を検出する。 (特定の周期的な変動成分は余り期待できない。)	◎	◎ 発電量/負荷の完全平衡時は不可。但し Δf 種分検出の併用で極めて有効。
3. 能動的な対策 (1)周波数シフト方式	○インバータの内部周波数に微小バイアスをかけておく。逆充電運転時に Δf のシフトを検出する。	◎	◎ 周波数シフト方向の統一により、変動の同期は不要。
(2)出力電力変動方式 ①有効電力変動	○インバータの出力有効電力を常に微小変動させる。 Δf や Δv の急増を検出して停止する。	◎	◎ 各システムの変動を同期させる必要がある。連系運転時に微小振幅変動を与えて置く。
②無効電力変動	○インバータの出力無効電力を常に微小変動させる。 Δf や Δi の急増を検出して停止する。	◎	◎ 逆充電運転時に正帰還ループを形成して大振幅変動に発展させる方法がある。
(3)出力電圧（電流）変動方式	○インバータの出力電圧または電流を特定のパターンで、出力電力に影響しない程度に変動させる。変動周期に一致する Δv や Δi の急増を検出する。	△	△ 疑似ランダムパターンを用いる方法など。各システムの変動を同期させるか、または十分なSN比を確保する必要がある。
(4)負荷変動方式	○インバータ外部に設置したインピーダンスを基本波の1サイクル毎に短時間挿入する。挿入周期に一致する Δv や Δi の急変を検出する。	◎	◎ 外部設置の抵抗を挿入する方法など、電源同期が容易。但し、他の方法を採用するシステムとの容量比に制限がある。

表5 各種単独運転（逆充電運転）防止方式の組み合わせ効果（分散電源側の対策）

	(1)位相急変	(2)高周波急変	(3)周波数急変	(4)周波数シフト	(5)有効電力変動	(6)無効電力変動	(7)負荷変動
受動的な方式							
(1) 位相急変検出	—	●	▲	○	○	○	○
(2) 高調波急変検出	●	—	●	●	○	○	○
(3) 周波数急変検出	▲	●	—	○	○	○	○
能動的な方式							
(4) 周波数シフト	○	●	○	—	○	○	○
(5) 有効電力変動	○	○	○	○	—	△	○
(6) 無効電力変動	○	○	○	○	△	—	○
(7) 負荷変動	○	○	○	○	○	○	—

註) 表中黒の記号で示す組合せは実証試験済み。高調波急変は3次検出方式。

②受動的な対策：配電線電圧の位相、周波数、高調波成分等の急変検出。

③能動的な対策：インバータの出力周波数や有効・無効電力を変動させる方式。

などが有効である。

但し、通常の電圧・周波数監視も逆充電運転発生

条件の極限化に有効であり、また、能動的な対策では最終的に電圧・周波数異常で停止させることが多いので、基本的な保護機能として必ず採用すべき機能である。

また、先の図-7に示したとおり、以上の諸方式を組合わせて使用すればさらに効果的であり、逆充電

運転現象を迅速に検出し、光発電装置を確実に停止させることができる。

一方、電気事業側で採用すれば有効な方式としてコンデンサ投入方式がある。コンデンサ投入方式では無効電力のバランスを崩すことで逆充電運転を防止する。これは原理的に非常に簡単な方式であるため、後備保護の一環として是非とも採用したい方式である。

表4～5に示した諸方式は六甲アイランドだけでなく、電力各社で開発された方式を含んでいるが、これらは逆充電運転防止のメニューとしてガイドラインに採用されている。

3.4 小型系統連系保護装置の開発

六甲アイランドの成果をもとに、逆充電運転防止を中心とする保護機能を取りまとめ、小型光発電装置用の系統連系保護装置を当所で試作した例を図-8に示す。保護機能を全てインバータに内蔵させることも可能であるが、外付け回路として独立させ標準化することにより、システム設置時の安全性審査や運用開始後の保護機能チェックが非常に簡単になる。

これは逆潮流ありのシステムを対象に、主として世の中へのデモンストレーション用に開発したもので、過電流、地絡検出機能のほか、配電線の電圧・周波数異常を検出する機能、逆充電運転防止機能を有している。逆充電運転防止には電圧位相急変と第3次高調波急変検出機能を備え、機能二重化により安全性の向上を図っている。性能は先の図-7のb)に示したとおりである。また、インバータの力率異常、高調波異常を検出し、性能劣悪な製品を連系しないようにしている。その他、各種の状態表示、計量表示機能や自己診断機能など豊富なサービス機能を搭載しているが、デジタル信号処理技術を適用して回路を単純化すること



図-8 小型系統連系保護装置の外観

により、1千～1万台ロットで4万円台の販売価格を達成できることが分かった。

家庭用にはパカチョン・オールインワン・タイプの系統連系保護装置が一番良い、と言うのが当所の結論である。

4. 小型光発電用インバータの信頼性

六甲アイランドにおける100台のインバータの障害実績(3年間)をもとに算出した結果では、表6に示すとおり、初期不良、取扱いミス等による障害を除いたMTBFは9万時間を越えている。これは米国等で実用に供されているインバータの信頼性実績(サンディア国立研究所、約3～4万時間)よりも、はるかに優秀な値である。

インバータの障害ではほとんど主回路の障害であるが、これ自体は最終的に過電流遮断器等で保護されるため、特に安全性に問題はない。障害は全て保護制御回路で適確に検出され、障害を抱えたまま運転を継続し、電力施設等に被害を与えた例は見出されなかった。

これら電子回路の信頼性データをもとに、新しい系統連系ガイドラインでは保護装置の二重化の必要性が除外されている。

表6 光発電用インバータの信頼性実績(六甲アイランド)(平成元年度～3年度通算)

メーカー (台数)	障害 件数	障害件数				MTBF ¹⁾ (10 ³ 時間)
		初期 不良	取扱 ミス	自然 劣化	サー ジ等	
A社(29)	1	0	1	0	0	>381
B社(29)	8	0	5	3	0	127
C社(8)	3	0	1	2	0	53
D社(13)	7	4	0	2	1	57
E社(8)	16	0	0	6	10	7
F社(13)	28	26*	1	1	0	171
合計 (100台)	63	30	8	14	11	53 (94)

註1) 各社MTBFは初期不良、取扱ミスを除いたもの。合計欄の括弧内は自然劣化のみ。年間稼働時間 4,380時間(一日12時間で計算)。

2) サージ等は、各種の配電線事故試験、逆充電運転等を実施した際、過電圧、過電流等により破損したものの、主として主回路障害。

3) *印: 初期不良のため改良、改良後は同一原因による障害なし。

5. まとめ

以上に述べてきたとおり、小型光発電装置の基礎技術はほぼ確立しており、あとは衆知を結集して実用化技術に磨きをかける段階にある。一方では技術基準、系統連系ガイドラインなどの法規制環境も着々と整備

されつつある。また、既に発電電力の電気事業による買取りも宣言されていることは周知の事実である。

このように技術、法的環境が整いつつある現在、残るのは具体的な普及促進策の推進とコスト低減の問題であり、太陽電池をはじめ、各周辺装置、システム開発、商品化に携わる方々の一層の努力を期待したい。

資料頒布について

下記の資料の在庫がございますので、御希望の方は事務局までお申し込み下さい。（各本学会会員価格）

1. 本会創立10周年記念出版図書「エネルギーと未来社会」
 - ・エネルギー・資源、環境問題をわかりやすく展望解説。 四六版, 325頁, 1,800円（送料共）
2. Proceeding of the Workshop on Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Policy Analysis (平成2年10月22日(月)～23日(火)ワシントンで開催)
 - ・MITと東京大学の主催による、環境問題へのアプローチを論じた貴重な国際会議資料。(英文) 602頁, 20,600円（送料, 税込）
3. 平成2年度第1回講習会研究資料「90年代のエネルギー展望」(平成2年11月1日(木)開催)
 - ・90年代の「エネルギー、資源、環境」問題への提言。 B5版, 47頁, 2,100円（送料, 税込）
4. 平成2年度第2回講習会研究資料「地球環境時代のエネルギー戦略」(平成3年2月15日(金)開催)
 - ・地球環境問題に主眼を置いたエネルギー、資源問題への提言。 B5版, 41頁, 2,100円（送料, 税込）
5. 平成3年度第1回講習会研究資料「ソーラーエネルギーの応用」(平成3年10月8日(火)開催)
 - ・ソーラー問題を多角的に捉え、幅広く提言。 B5版, 55頁, 2,100円（送料, 税込）
6. 「エネルギー貯蔵システムに関する欧米調査」報告書(平成3年6月29日(土)～7月13日(土)派遣)
 - ・エネルギー貯蔵に関し、欧米数ヶ国の関連施設の見学、調査、情報交流の結果について報告。 B5版, 83頁, 4,200円（送料, 税込）
7. 平成3年度第2回講習会研究資料「分散エネルギーシステム」(平成4年2月13日(木)開催)
 - ・新エネルギーの活用を中心とした、分散型エネルギーの紹介。 B5版, 57頁, 2,100円（送料, 税込）
8. 第11回研究発表会講演論文集(平成4年4月15日(木)～16日(木)開催)
 - ・62件に亘る研究発表を収録。 B5版, 354頁, 6,200円（送料, 税込）
9. 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集(平成5年1月27日(木)～29日(金)開催)
 - ・81件の研究発表を収録。 B5版, 464頁, 7,300円（送料, 税込）
10. 平成4年度第2回講習会研究資料「地球環境問題解決へのアプローチ」(平成5年2月19日(金)開催)
 - ・地球環境問題を多角的視野からとらえた資料。 B5版, 91頁, 2,100円（送料, 税込）
11. 第12回研究発表会講演論文集(平成5年4月14日(木)～15日(木)開催)
 - ・48件の研究発表を収録。 B5版, 272頁, 7,300円（送料, 税込）
12. 第3回エネルギー基礎講座テキスト(平成5年6月23日(木)～25日(金)開催)
 - ・「先端技術者研修」として、エネルギー、資源、環境、経済に亘る9件のテキスト、 A4版, 133頁, 4,200円（送料, 税込）

【申込先】 〒550 大阪市西区京町堀1-9-10(帽子会館) エネルギー・資源学会 事務局宛

TEL 06-446-0537 FAX 06-446-0559

【払込方法】 1. 現金送金 2. 郵便振替…大阪3-302948
3. 銀行振込………大和銀行御堂筋支店(普) No. 1024046 エネルギー・資源学会名義

(注) 支払いには、消費税3%が含まれています。

特集

太陽電池実用化の取り組み

太陽光発電普及促進施策「新エネルギー発電フィールドテスト事業」

Field Testing of New Energy (Photovoltaic) Power Generation Sources

向山光幸*

Mitsuyuki Mukohuyama

1. はじめに

新エネルギーには、太陽光発電、風力発電、地熱発電等自然エネルギーを利用したものと燃料電池発電、電力貯蔵、未利用エネルギー（ゴミ発電等）等、高効率エネルギー（省エネルギー）の利用システムが含まれる。

自然エネルギーを中心とする太陽光発電等新エネルギーは、潜在的なエネルギーの量は大きいものの、エネルギー密度が小さい、気象条件に左右されやすい、設置に要するスペースが大きい等の性質があり、また既存のエネルギーに比べてコストが高いといった課題が残されている。また、エネルギーの一層の安定供給、近年クローズアップされている地球温暖化等地球環境問題対策の上からも、積極的な開発、導入が必要とさ

れている。

現在、サンシャイン計画等を中心として、太陽光発電等新エネルギーに関する効率の向上、低コスト化等の技術開発が推進されているとともに、技術的に実用化に近い段階にあるものについては、導入を促進するための種々の施策が講じられているところである。

新エネルギー発電フィールドテスト事業は、この一環として平成4年度からスタートした事業である。以下、太陽光発電を中心とした本事業の概要、平成4年度実施例等を紹介する。

2. 新エネルギー発電フィールドテスト事業

2.1 目的

技術開発の進展に伴い、太陽光発電設備、燃料電池発電設備は技術的にはほぼ実用化段階に達しているもの

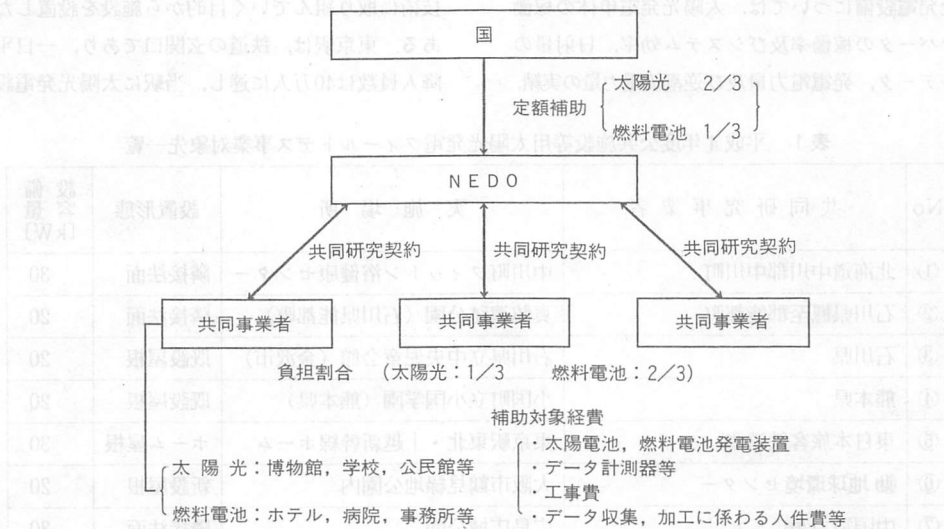


図-1 新エネルギー発電フィールドテスト事業の実施スキーム

*新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

新エネルギー導入促進部導入企画課長

〒170 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 29F

の、経済競争力がなく及び実際の使用条件の下で信頼性に関するデータが十分に蓄積されていないこと等から、導入普及が進んでいない現状にある。

このような状況において、新エネルギー発電フィールドテスト事業は、最終普及形態の各種施設へ試験的に設置し、実際の負荷の下で長期運転を行い、得られる各種データを関係機関、将来のユーザー等に提供することにより、今後の本格的導入普及への素地の形成を図ることを目的としたものである。

2.2 事業内容

太陽光発電設備については、公民館、学校、博物館、県庁等庁舎、体育館等の公共施設への設置、燃料電池発電設備については、ホテル、病院、事務所ビル等への設置を対象として、その設置費用及びデータ収集費用のうち、太陽光発電設備では2/3、燃料電池発電設備では1/3を新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が負担し、相手事業者との共同研究方式で実施するものである。本事業の実施スキームは図-1のとおりである。

基本的には、設備の設置は単年度で行い、実証運転を設置年を含め5年間継続し各種の運転データを収集する。このデータをNEDOにおいて分析、解析、評価して、本格的導入普及に有用な資料として取りまとめることを内容としている。

太陽光発電設備については、太陽光発電単体の稼働率、インバータの稼働率及びシステム効率、日射量のローカルデータ、発電電力量及び逆潮流電力量の実績、

装置・システムの信頼度、太陽光発電システムの安定化、ピーク削減効果等の各種データを収集することとしている。

平成5年度以降、平成4年度から実証運転に入っている施設の各種データを順次関係機関等へフィードバックする予定である。

2.3 平成4年度実施内容

(1) 概要

平成4年度においては、昨年6月下旬に一般公募を行い、共同研究計画提案書が提出された中から、計画の具体性、普及への啓発効果等を勘案して、共同事業者及び対象施設を採択した。表1に示すとおり、11件（総設備容量235kW）を採択し、一部を除いて既に設備の設置は完了し、現在実証運転に入っているところである。

(2) 平成4年度実施例

① 東日本旅客鉄道(株)（東京駅）

「鉄道駅舎」という公共施設において、東京駅東北・上越新幹線ホーム上屋に太陽光発電設備を設置するにあたっては、東日本旅客鉄道(株)は、旅客案内設備や昇降装置の整備、空調や照明の改善等、人に優しい駅づくりによって電力消費が増えていくことから、効率的な使用と供給に併せて、環境に優しいエネルギー技術に取り組んでいく目的から施設を設置したものである。東京駅は、鉄道の玄関口であり、一日平均の乗降人員数は40万人に達し、当駅に太陽光発電設備を設

表1 平成4年度公共施設等用太陽光発電フィールドテスト事業対象先一覧

No	共同研究事業者	実施場所	設置形態	設備容量(kW)
①	北海道中川郡中川町	中川町フィットン浴健康センター	隣接法面	30
②	石川県鳳至郡能都町	真脇遺跡公園（石川県能都町）	隣接法面	20
③	石川県	石川県立中央児童会館（金沢市）	既設屋根	20
④	熊本県	小国町立小国学園（熊本県）	既設屋根	20
⑤	東日本旅客鉄道(株)	東京駅東北・上越新幹線ホーム	ホーム屋根	30
⑥	(株)地球環境センター	大阪市鶴見緑地公園内	新設屋根	20
⑦	中国電力(株)	広島広域公園	隣接法面	30
⑧	(株)静岡県産業環境センター	都田研究所（浜松市）	新設屋上	10
⑨	(株)国際環境技術移転研究センター	ICETT研修棟（四日市市）	新設屋上	10
⑩	兵庫県	淡路農業技術センター	地上	25
⑪	熊本県天草郡天草町	国民宿舎「あまくさ荘」	既設屋上	20

(235)



写真1 東京駅ホーム上屋に設置した太陽光発電

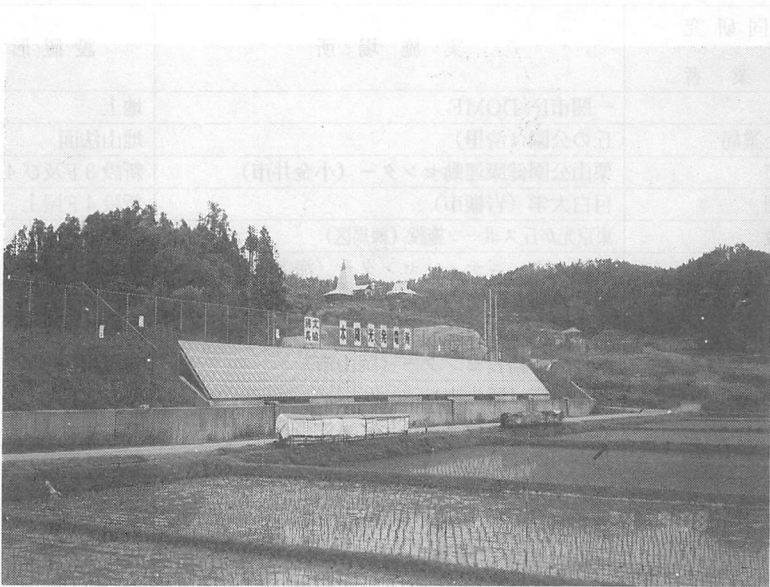


写真2 真脇遺跡公園に設置した太陽光発電

置することの啓発効果は多大である。

太陽光発電設備は、東京駅東北・上越新幹線ホームの上屋に設置し、系統連系システム（逆潮流あり）を採用し、発電電力は駅舎電気設備（照明、空調、ポンプ用）電源として利用される。

本システムは、本年3月2日に運転開始されているが、鉄道駅舎上屋利用に適した太陽光発電システムの設計として、電車電流の影響等太陽電池設置に関して鉄道特有の問題があるが、鉄道環境に適した太陽電池

設置について、架台構造の詳細決定が行われ、また、自家用電気工作物の電力系統（自営電力系統）と保護協調のとれた連系方式について、構成と機能が明確化されている。

今後は、運転データを継続して収集し、鉄道駅舎上屋利用の太陽光発電システムの適用性や安定性の実証及び駅電源系統に与える効果等に寄与するものと考えられる。

（システムの概要）

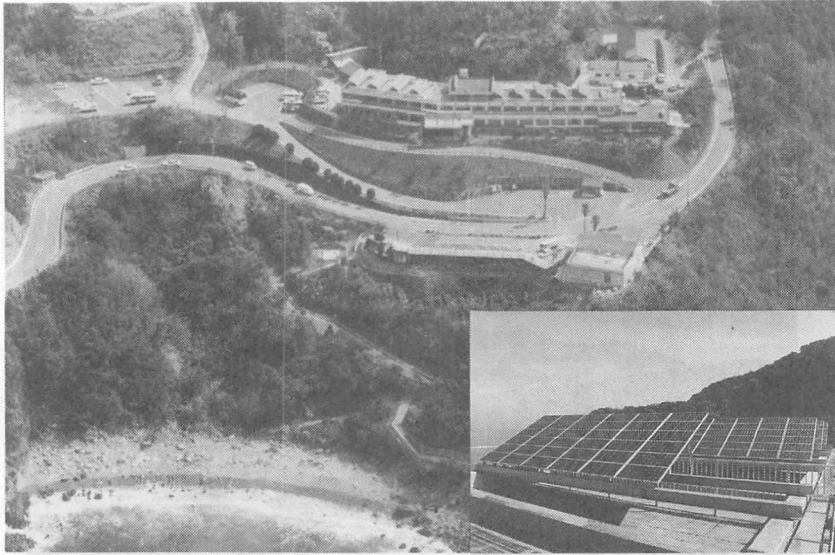


写真3 あまくさ荘に設置した太陽光発電

表2 平成5年度公共施設等用太陽光発電フィールドテスト事業対象先一覧

No	共同研究 事業者	実施場所	設置形態	設備 容量 (kW)
①	一関市	一関市I-DOME	地上	20
②	山梨県企業局	丘の公園(清里)	地山法面	95
③	小金井市	栗山公園健康運動センター(小金井市)	新設3F及び4F屋上	10
④	目白学園	目白大学(岩槻市)	新設4F屋上	30
⑤	前田建設	東京光が丘スポーツ施設(練馬区)	新設2F屋上	20
⑥	海老名市	地域コミュニティセンター(海老名市)	新設3F屋上	20
⑦	コープかながわ	横浜東部共同購入センター(鶴見区)	既設屋根	10
⑧	但馬福祉園	老人ホーム妙見荘(八鹿町)	既設2F屋上	30
⑨	岡山市	上道学校給食センター(岡山市)	新設屋根	10
⑩	岡山県企業局	岡山県庁(岡山市)	既設5F屋上	20
⑪	大分県	大分県農業技術センター(宇佐市)	地上	20
⑫	神奈川県	神奈川県産業技術総合研究所	新設4F屋上	30
⑬	コープしが	シルヴィーコープ彦根(彦根市)	新設店舗2F屋上	15
⑭	滋賀県	滋賀県立大学(彦根市)	新設2F屋上	15
⑮	肱川町	肱川町「風の博物館」	新設3F屋上	20
⑯	大分県	大分県工業技術センター(大分市)	新設3F屋上	50
⑰	サントリー	サントリーミュージアム(大阪市)	新設9F屋上	13
⑱	柳学園	柳学園(淡路島)	新設2F屋上	13
⑲	フェニックスリゾート	フェニックスリゾート「シーガイア」(宮崎市)	新設2F屋上	40

[481]

太陽電池：30kW(最大出力・32,140WP)単結晶

アレイ構成：12直列48並列

アレイ角度及び方位：角度10°，方位南

モジュール数：576枚 面積294㎡

インバータ：30kW(出力電圧AC 3φ 200V)

②石川県能都町(真脇遺跡公園)

「公園」という公共施設への太陽光発電設備の設置

にあたっては、縄文時代の体験公園づくりを目指して整備が進められている真脇遺跡公園に太陽光発電設備を設置することは、縄文人も使ったであろう太陽エネルギーを現代人も同様に太陽エネルギーを利用するというユニークな啓発効果があるものと考えられる。また、能都町は現在環境に優しい街づくりを推進しており、特に太陽エネルギーモデル都市を目指し、「ソー

ラータウン能都町」5ヵ年計画を策定中である。

太陽光発電システムは、真脇遺跡公園の隣りにある小学校のグラウンドの傾斜地法面に設置し、系統連系システム（逆潮流あり）を採用し、発電電力は公園内温泉浴場の照明、公園の照明用電源として利用される。

システムの建設は、平成4年12月1日に着工、平成5年3月17日に系統連系を開始し、同月24日に竣工した。これらの太陽光発電システムの計画・設計から建設・運転に至るまでのノウハウは、今後、公園における太陽光発電システム建設の一つの指針となるものと考えられる。また、実証運転では、系統連系を開始した3月17日からの運転データの収集が鋭意行われており、太陽光発電システムの適用性や安全性の実証が進められているところである。

（システム概要）

太陽電池：20kW（最大出力20,736wp）多結晶
アレイ構成：18直列24並列
アレイ角度及び方位：角度50° 方位南
モジュール数：432枚 面積189㎡
インバータ：20kW（出力電圧AC 3φ 200V）

③熊本県天草町（国民宿舎「あまくさ荘」）

「あまくさ荘」は、客室25部屋、収容人員107名の町営の国民宿舎で、天草島の西海岸に面しており、天草灘の夕陽が見事な場所として、来訪者に喜ばれているところである。

「国民宿舎」という公共施設への太陽光発電設備の設置は、県内外の視察研修、観光客の増加を招き、啓発の役割を果たせるとともに、観光地天草を考えた場合、環境の保全、景観対策上大いに有意義と考えられる。また、天草町長は「この国民宿舎「あまくさ荘」を自然環境保護及びエネルギー問題と考え、体験する交差点と位置付け、地域住民と行政の交差点、住民と住民のコミュニケーションの交差点及び地域住民と来訪者との交差点というように環境問題を考えるうえで、自然の尊重と互いの尊重を語り合う「場」とする」と位置付けている。

太陽光発電システムは、宿舎の屋上に南北2ヶ所に分けて設置し、系統連系システム（逆潮流あり）を採

用し、発電電力は宿舎内の照明、空調用等の電源として利用される。

（システム概要）

太陽電池：20kW（最大出力20,196wp）多結晶
アレイ構成：18直列22並列
アレイ角度及び方位：角度30°方位南
モジュール数：396枚 面積174㎡
インバータ：20kW（出力電圧AC 3φ 200V）

2.4 平成5年度実施内容

平成5年度においては、本年4月下旬に一般公募を行い、共同研究計画提案書が提出された中から、前述のとおり新エネルギー発電フィールドテスト事業として取り上げることが適切と思われる案件を採択したところである。

表2に示すとおり、19件（総設備容量481/kW）を対象に共同研究を実施することとなっており、これから太陽光発電設備の設置工事が進められる予定である。

3. おわりに

新エネルギー発電フィールドテスト事業は、平成4年度からスタートしたばかりの事業で、この事業によって発電される電力量は微々たるものであるが、各地域においてこのシステムの設置が増えていくことにより、一般の人々の目に触れる機会が多くなり、関心も高まっていくものと予想され、またその啓発効果は多大なものがあると思われる。

この新エネルギー発電フィールドテスト事業の開始によって、新エネルギー導入に係る手続きの簡素化、系統連系ガイドラインの策定等制度面からの導入促進への施策がとられる一方、電気事業者が太陽光発電システムからの余剰電力を販売電力とほぼ同等の価格で購入するといった姿勢もみられ、今後官、民あげて太陽光発電を普及させるための種々の施策、改善等が行われていくことであろう。

本事業の事例が口火となって、今後クリーンなエネルギーである太陽光発電システムが本格的に導入されることを期待している。

■ シリーズ特集 ■ 明日を支える資源 (47)

無尽蔵な資源：マグネシウム

Inexhaustible Natural Resources : Magnesium

鷹 城 一 夫*

Kazuo Takashiro

1. 緒 言

最近、実用金属の中で一番軽く且つ資源的には無尽蔵であり、リサイクル可能な材料として、マグネシウムが脚光を浴びようとしている。

人類が、仮に数十億年生存したとしても、枯渇する心配の無い唯一無二の金属材料、それはマグネシウムである。資源としては無尽蔵で、利用可能な材料としては貧弱なのがマグネシウムである。

自由世界のアルミニウム地金の生産量は1900万トンの新地金と400万トンの再生地金で合計2300万トンと言われているが、マグネシウムはその1%強の25万トンが自由世界で使用されているに過ぎない。アルミニウムでは、50万トン～100万トンプラントといったスケールメリットが需要の大幅な成長を促して来たが、マグネシウムには同じ事を期待する事は出来ない。塩素ガスを大量に副産するだけに、この大量の塩素ガスを消費する用途が無いとコストダウンを伴った大量生産が出来ないからである。

2. 資 源

マグネシウム資源は、海水中に1272PPMとアルミニウムの0.5PPM、鉄の0.02PPMに比べても多い。海水中だけでも 1.65×10^{16} 億トンと言う、天文学的な量が賦存しており、河川より流入する量を考慮すれば、この量は減る事はないであろうと思われる。河川よりの流入がなかったとしても、人類が今後30億年生存し、現在と同じペースで使用したとしても、海水中のマグネシウムの1000万分の1しか使用出来ない程である。

一方、地殻中にもクラーク数2.09%で、8番目に豊富な金属であって、酸化物(ペリクレーズ)・炭酸化物(マグネサイト・ドロマイト)・水酸化物(ブルーサイト)・塩化物(カーナライト、岩塩、鹹水)等の

形態で大量に賦存している。表1に海水中の鉱物資源の成分表を、表2に地殻中の主要鉱物資源を示す。

ペリクレーズやブルーサイトはマグネシウム含有量は多いが、埋蔵量は多くない。マグネサイトは95%程度の純度のもので可成りの量存在しており、900℃で仮焼すれば、活性度の高い酸化マグネシウムが得られる。1500℃の高温で焼成するとマグネシアクリンカー

表1 海水中の成分

Element	ppm
1) chlorine	18,980
2) sodium	10,561
3) magnesium	1,272
4) sulfur	884
5) calcium	400
6) potaggium	380
7) bromine	65
8) carbon	28
9) strontium	13
10) boron	4.6
14) aluminum	0.5
21) iron	0.02

表2 マグネシウム鉱物

Minerals	composition	Mg%
Periclase	MgO	60
Brucite	Mg(OH) ₂	41
Magnesite	MgCO ₃	28
Dolomite	MgCO ₃ ・CaCO ₃	13
Olivine	(MgFe)SiO ₄	28
Serpentine	3 MgO・2 SiO ₂ ・2 H ₂ O	26
Talc	3 MgO・4 SiO ₂ ・H ₂ O	23
Sea Water	NaCl・KCL・MgCL ₂	0.13
Brine	"	0.7~3
Carnallite	MgCL ₂ ・KCL・6 H ₂ O	9
Kieserite	MgSO ₄ ・H ₂ O	17
Kainite	MgSO ₄ ・KCL・3 H ₂ O	9

* 憐帝産インダストリーズ 取締役

〒409-25 山梨県南巨摩郡身延町下山10450-1

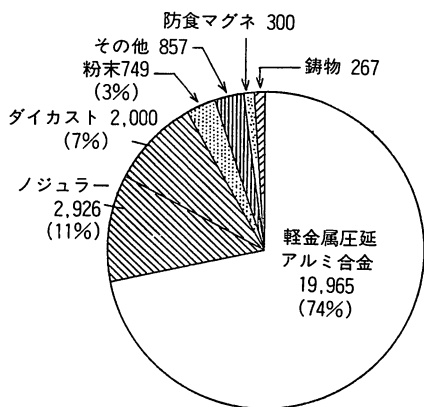


図-1 マグネシウム用途構成 国内需要合計 27,064t (90年)

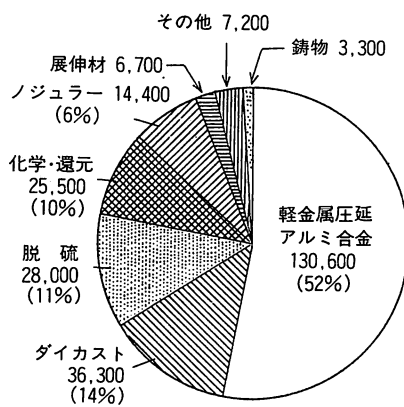


図-2 マグネシウム用途構成 自由世界需要合計 252,000t (90年)

となって、活性度は無くなり、耐火煉瓦の材料として使用される。ドロマイトは世界中の至る所に豊富に賦存している。鹹水は米国のソルトレイクシティが有名であるが、高濃度の塩水は死海その他に見られる。岩塩は東部ドイツのものが歴史的には有名である⁹⁾。

3. マグネシウムの需給状態

世界の需要構成と日本の需要構成には特徴的な差異があるが、アルミニウム業界に支えられている事は同じである。

マグネシウムの需給の変遷は軍需用の需要の盛衰に支配されて来た。第二次世界大戦中の22.7万トンの需要が戦後1万トンに迄急落したのを背景に、ダウケミカルが試みた民需開発の努力や安いマグネシウムをマーケットに提供する為になされた、色々な地金メーカーの努力の結果が現在の25万トン態勢を作り出した。図-1に国内の需要構成を、図-2に世界の需要構成を示

す⁹⁾。

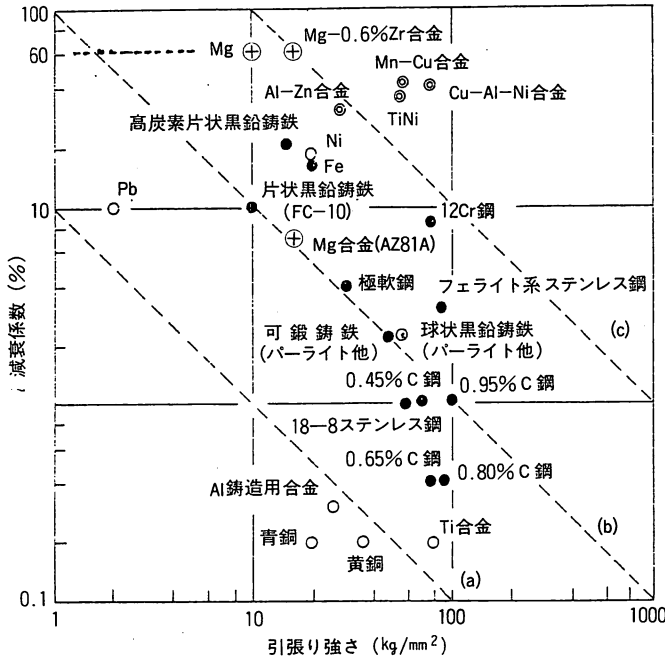
3.1 マグネシウムのセールスポイント

マグネシウムの需要開発の為に、この合金の優位性のみが強調されている。つまり、①実用合金中で一番軽い。②比強度、比耐力が大きい。③純マグネシウムもしくは若干のジルコニウム (Zr) かマンガン (Mn) を添加した合金はダンピングキャパシテイ (減衰係数) が大きい。④デントレジスタンス (耐クボミ性) が良い。⑤切削加工性が良い。⑥溶解エネルギーが小さい。⑦鉄と合金を作らないので、鉄製ルツボをそのまま使用出来る。等が言われている。表3に主要材料の機械的性質を、図-3にダンピングキャパシテイと強度の関係を示す⁹⁾。

反面、最近のダイカスト合金の耐食性はアルミニウムダイカスト合金と同等かそれ以上に良くなっているが、電氣的に卑なる金属であるので異種金属との接触による電氣的腐食には十分な配慮が必要である。一方

表3 主要材料の機械的性質

合金名		比重	引張強度 Kg/mm ²	耐力 Kg/mm ²	伸び %	硬さ HB	比強度	比耐力
Mg	圧延材MP1	1.78	30	21	9	73	16.9	11.8
	押出材AZ31	1.80	35	24	7	80	19.4	13.3
	鋳物MC3T6	1.82	28	16	2	84	15.4	8.8
AL	圧延材5052	2.67	29	25	14	85	10.9	9.4
	押出材2017	2.79	43	28	22	105	15.4	10.0
	鋳物AC6AT6	2.77	27	17	4	85	9.7	6.1
Fe	ステンレス	8.02	122	108	15	350	15.2	13.5
	炭素鋼	7.86	63	43	22	175	8.0	5.5
	鋳鋼	7.84	63	42	25	185	8.0	5.4



- ⊕ マグネシウム
- ⊙ 制振合金材料
- 鉄鋼材料
- 非鉄材料

減衰係数：材料の0.2%永久ひずみに相当する引張応力の大きさを σ_y とし、 $\sigma_y/10$ のせん断応力振幅を用いて、測定したものの。

図-3 金属材料の減衰係数と強度の関係

では電氣的に卑な金属である事を利用して、橋梁等の屋外の鉄骨構造物の防食用に用いられている。

その化学的に活性な事を利用して、チタン製造では還元剤として用いられ、金属マグネシウムのハロゲン化アルキル化合物の激しい反応性を利用してグリニヤール試薬が作られ、これを用いてより複雑な分子を合成したり、分子構造を決定するのに用いられている。粉末のマグネシウムチップは主として化学的な用途に用いられているが、軍事用にも用いられている。

4. マグネシウムの価格

マグネシウムとアルミニウム地金の価格の推移を

図-4に示す⁷⁾。

マグネシウム地金の価格はダウケミカルとノルスクヒドロの2大サプライヤーの建値によって決められているが、アルミニウム地金に対しては、高値安定型の推移を示している。

自動車産業での期待価格はアルミニウム比1.5~1.7倍と言われているが、昨今のアルミニウム地金コストの低落によって、その差は一段と大きくなっている。CAFE規制⁸⁾によって自動車の車体重量軽減要求は

註a) Corporate Average Fuel Economy (会社平均燃費)

表4 ダイカスト合金の熱的性質

特性	合金名	マグネ合金 AZ91A	アルミ合金 ADC12	亜鉛合金 ZDC2
平均比熱 (Kcal/Kg°C)		0.28	0.23	0.1
融解熱 (Kcal/Kg)		89	93	24
熱伝導率 (CGS)		0.19	0.24	0.27
熱膨張係数 (1/°C)		26×10^{-6}	21×10^{-6}	27×10^{-6}
放出熱 (Kcal/dm³)*		310	450	300
対Mg比率		1	1.4	1
融解熱 (Kcal/dm³)**		480	630	430
対Mg比率		1	1.3	0.9

* 凝固開始温度+50°Cより鋳物取り出し温度 (Mg, ALは315°C, Znは215°Cとする)迄低下する時に放出する熱量
 ** 常温より融解温度+50°C迄加熱するに要する熱量

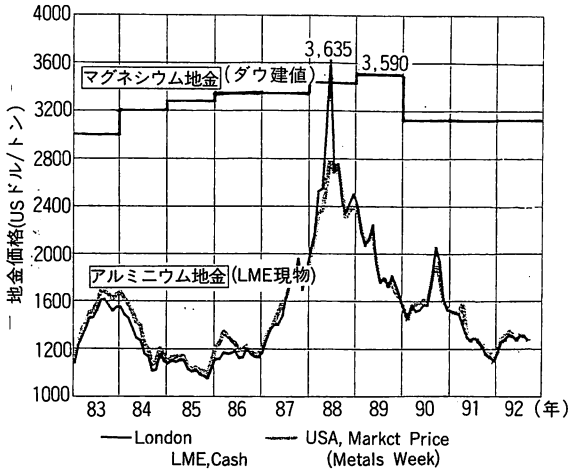


図-4 マグネシウムとアルミニウムの価格推移

大きいものとなっているが、地金価格のみならず、加工コストが高い事や溶解ロスが大きい事、加工業者が少ない事、取り扱い上に若干の危険性を伴う（危険の伴わない金属の溶解・鋳造作業は無いが）事、安定した需要が無い事、自動車産業に於ける大量使用に対する安定価格と量の安定供給の保証が無い事等の原因が

マグネシウム業界の裾野を広げる妨げとなっている。

5. マグネシウム地金の製造メーカー

自由世界の生産能力330,500トンの内ダウケミカルとノルスクヒドロの2社で185,000トンを占めている。また、電気分解法による生産量は224,500トンである。旧共産圏では生産能力114,000トンの内ロシアの100,000トンが電気分解法である。熱還元法による大量生産はマグネテルム法によるものが殆んどであるが、ケイ素の混入量が高いので、殆んどがアルミニウム合金の添加材料として用いられている。ピジョン法によって造られる地金は高純度であるが、人為的な操作部分が多く、コスト高になっている。

世界のマグネシウムメーカー一覧表を表5に示す³⁾。

6. 歴史的背景

1808年Sir Humphry Davyによってマグネシウムアマルガムよりマグネシウムがつくられて以来、色々な研究者によって工業化の試みがなされた。

初めての工業的な生産がGraetzeltとFisherによってカーナライトを電気分解して得られる様になったの

表5 世界のマグネシウムメーカー一覧表

国名	会社名	能力	製造方法	原料
米 国	Dow Chemical Co	95,000	DOW式電解法	海水
	Northwest Alloys	40,000	マグネテルム法	ドロマイト
	Magcorp	38,000	電気分解法	塩水
	小 計	173,000		
カナダ	Timmico Cromasco Div	12,000	ピジョン法	ドロマイト
	Norsk Hydro	40,000	IG式電解法	マグネサイト (中国産)
	Magcan Ltd	12,500	MPLC式電解法	マグネサイト (休止中)
	小 計	76,500		
ブラジル	Brasileira do Magnésio S.S	12,000	熱還元法	ドロマイト
ノルウェー	Norsk Hydro	50,000	I.G式電解法	ドロマイト・海水 塩水
フランス	Sofrem	15,400	マグネテルム法	ドロマイト
イタリア	Italiano Magnesio	12,000	熱還元法	ドロマイト
日 本	宇部興産	9,000	ピジョン法	海水
	日本重化学	5,000	マグネテルム法	ドロマイト
インド	National Metal Labs	1,500	—	—
	Tami Nadu Chem. Products	6,000	—	果汁
自由世界	合 計	343,000		
ロ シ ア	Berzinik (ロシア)	20,000	電解法	マグネサイト 塩水
	Solikamsk (ロシア)	5,000		
	Zaporodyhe (ウクライナ)	15,000		
	Leninglad (ロシア)	5,000		
	Kalush (ウクライナ)	15,000		
	Kama nogorsk (カザフ)	40,000		
中 国	湖南省 衡陽	合計 9,000	熱還元法 電解法	マグネサイト ドロマイト
	内モン古 包頭			
	青海省 民和			
	寧夏自治区			
ユ ー ゴ	Magnohrom	5,000	マグネテルム法	ドロマイト
	Oour Bela Stena	5,000		
東 欧 圏	合 計	114,000		

は、1886年であった。当時の生産量も10トン/年に過ぎなかった。Charles Martin Hallが氷晶石を溶剤としてアルミナを溶解し、電気分解に成功したのも1886年であった。彼が作ったPittsburgh reduction CoはALCOAの前身である。1903年、ライト兄弟が初飛行に成功し、その後の第一次世界大戦、第二次世界大戦と、飛行機が目覚ましい発達に伴ってマグネシウムもアルミニウムもその需要は増大した。

1915年Herbert Dowが米国でマグネシウムの生産を開始した。当時の北米最大のマグネシウム工場は、カナダのモントリオールにあったShawinigan Electro Metals Coであったが、日産量は3~400Kg/日であった。当時の電気分解エネルギーは50Kw/KgMgと理論値5.5Kw/KgMgの9倍もの電気分解エネルギーを要した。これは、塩素化効率50%と低く、不純物による大量の沈澱物が発生した為である。この理論的電気分解エネルギーの外に、熱として必要なエネルギーは4720KJ/Kgである。

この会社のGeneral ManagerであったBackerによって仮焼マグネサイトをカーボンの存在下で塩素化する特許が1920年に出され、後のI. G. Farden Industrie AGに買い取られ、10年後にI. G法として

の基本が完成された。Backerは1920年、ノルウェーのベルゲンにDeNorske Saltverker A, Sを作り、500トン/年の生産を始めたが、不況の為1922年には工場は閉鎖せざるを得なかった。

一方、Griesheim Electron A. GのDr Pistorによって1920~30年代になされた用途開発と製造技術の研究開発がI. G法の改善・改良を成し遂げたと同時に、熱還元法であるピジョン法やマグネテルム法の出発点ともなった。彼によって、ドイツ東部に産する膨大な量の岩塩を原料とするI. G法での電気分解エネルギーは19KW/KgMgに迄向上した。

1938年にはドイツのマグネシウム生産量は世界の生産量32,000トンの内の20,000トンを生産する迄になった。この頃の米国での生産量は2,500トンであり、内需はわずか220トンに過ぎなかった。又、この生産量内の28,000トンはI. G法によって生産された。

第二次世界大戦の勃発と共に、世界のマグネシウム生産量は228,000トンに迄跳ね上がり、この内の128,000トンが米国での飛行機の生産に用いられた。現存するマグネシウム関係の研究報告もこの頃のものが一番多い。

この当時に、わずか9ヶ月で造られた、ネバダ州へ

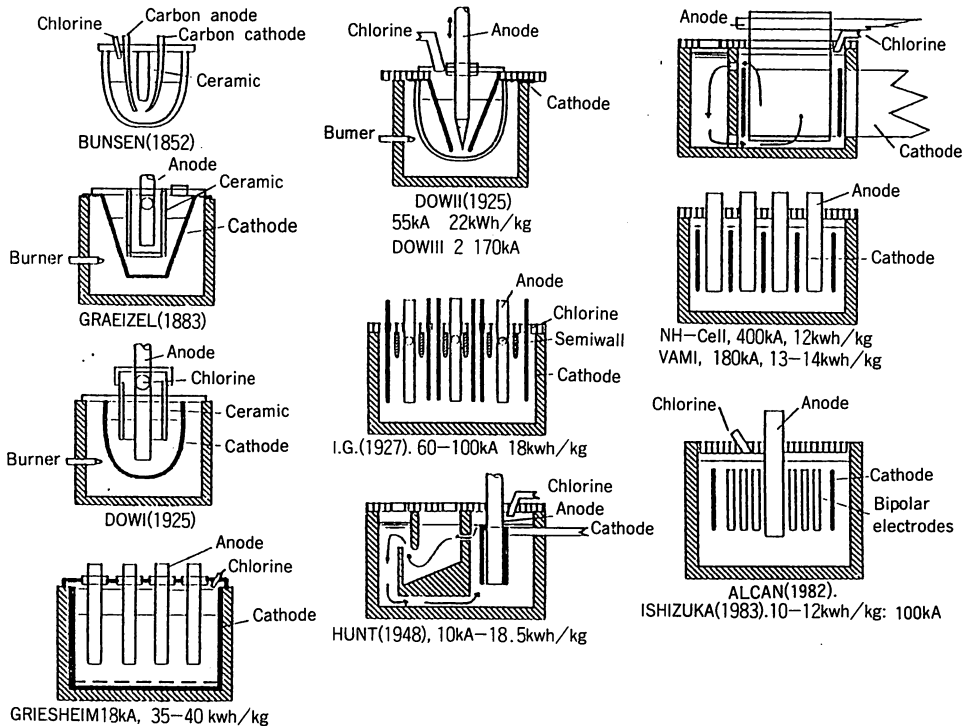


図-5 マグネシウム電解炉の変遷

ンダーソンのBasic Magnesium Incの50,000トンプラントでは、電極用に使用する銅が不足していた為米国財務局より放出された4,000トンの銀で代用したが、常時FBIのエージェントが監視していたとの話がある。

1941年にはI. Gの特許による熱還元法の実用化がProf Pidgeonによって試みられ、1942年にはカナダのオンタリオ州に3,500トンのプラントが完成した。熱還元法による最初の量産工場である。

1943年にはドイツ軍がノルウェーのボルスグルンにI. G電解法による10,000トンのプラントを完成させたが、イギリスからの米軍の爆撃により、生産は順調ではなかったが、1951年に再稼働させた時にはチョットした修理で再稼働出来た。

第二次世界大戦終了と共に世界のマグネシウムの生産は10,000トン/年に迄落ち込んだ。

この様に軍需を主体として来たマグネシウムが第二次大戦後は民需の開発に力を注ぎ、昨今は250,000トン/年の生産を維持している。

ある将来展望によると、将来の電気分解エネルギーは8~10KW/KgMgが期待出来、電解槽単位面積当たりの生産量はアルミニウムの2倍が期待出来ると言っている。図-5に電気分解法の変遷を示す⁴⁾。

7. マグネシウム製造の理論的背景^{1, 2)}

マグネシウムを製造する製造原料としては、その酸化物が炭酸化物、塩化物が適している事は図-6より明らかである。

電気分解原料の塩化マグネシウムを造るのに、今後の主流となると考えられる仮焼した活性度の高い酸化

マグネシウムを塩素化して電気分解するI. G法と、海水や鹹水から取った塩化マグネシウム濃縮液を脱水して得られる1.25水塩を電気分解するDOW法がある。

塩化マグネシウムは1.25水塩以上に脱水すると分解して酸化マグネシウムとなってしまうので、DOW法では塩化マグネシウムと水を同時に電解する事になる。

熱還元法は仮焼した酸化マグネシウムを75%フェロシリコンで還元する方法であるが、28Ni、14Cr製のレトルト内に充填したブリケットを外部より加熱・高真空下(10⁻³Torr)で還元するピジョン法と堅い型炉の中に上述のブリケットを充填し、この充填層を加熱・低真空下(25Torr)で還元するマグネテルム法がある。

7.1 塩化物

アルカリ金属、アルカリ土類金属の塩化物は塩化マグネシウムより安定であるが、希土類元素の塩化物はマグネシウムによって若干分解される。トリウム・ジルコニウム・アルミニウム・ベリリウム・その他の塩はマグネシウムによって還元されてメタルの中に溶け込む。

7.2 弗化物

弗化ナトリウムと弗化カリウムはマグネシウムによって激しく還元される。リチウムとアルカリ土類金属の弗化物も若干ではあるが還元されると考えられる。希土類元素の弗化物も幾らか還元されるが塩化物の場合程ではない。トリウムの弗化物は非常に良く還元される。ジルコニウム・ベリリウム・アルミニウム・マンガ・亜鉛の弗化物もマグネシウムによって還元される。

7.4 酸化物

マグネシウム以外の酸化物は程度の差はあるが、全てマグネシウムによって還元される。カリシウム・ランタン・トリウムの酸化物は最も安定であるので還元されない。一般的に水溶性の物質は熔融塩浴に可溶であるが、酸化マグネシウムはアルカリ金属やアルカリ土類金属の混合浴には殆ど溶けない。

以上の様な結果から、電気分解浴の組成はNaClとKCLに富む浴にBaCl₂とCaCl₂を加えて比重を重くし、これに余り多くないMgCl₂を加えた浴が適当であるとの結論に達した。

浴組成の一例を挙げると、CaCl₂40%、NaCl30%、KCL20%、MgCl₂10%である。

KCLとNaClは浴の中で複塩を形成しMgCl₂が分解してMgOになるのを防ぐ。LiClが比重は軽い浴

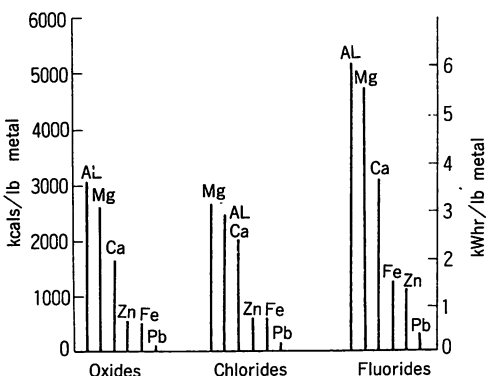


図-6 各種化合物からその金属1ポンドを分離するのに要するエネルギー

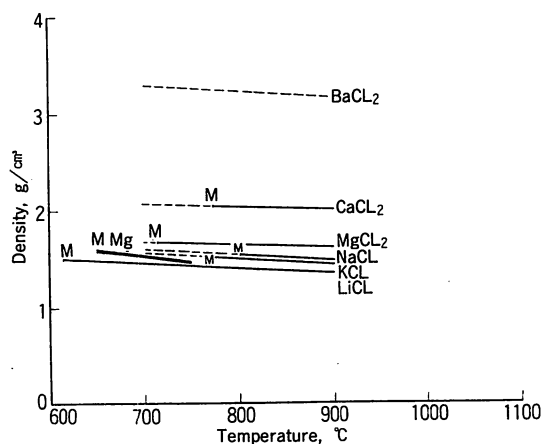


図-7 マグネシウム及びアルカリ金属、アルカリ土類金属の塩化物の融点と比重

の電気伝導度を高める目的で添加される。無水塩化マグネシウムは713°Cで溶けるが電気伝導度は低い。電気伝導度はLiCl/NaCl/KCl/CaCl₂/BaCl₂/MgCl₂の順に低くなる。各種金属の塩化物の温度と比重の関係を図-7に示す。

8. 各種のマグネシウム製造方法

各種のマグネシウム製造法の簡略化したフローシートを図-8に示す³⁾。

9. 結言：資源としてのマグネシウムの問題点

大量生産に適した電気分解法では大量の塩素ガスが副産物として発生する事は前述したが、有機化学の分野での塩素ガスの使用が、二次公害の元凶として嫌われている昨今では、この塩素ガスを有効に利用できる

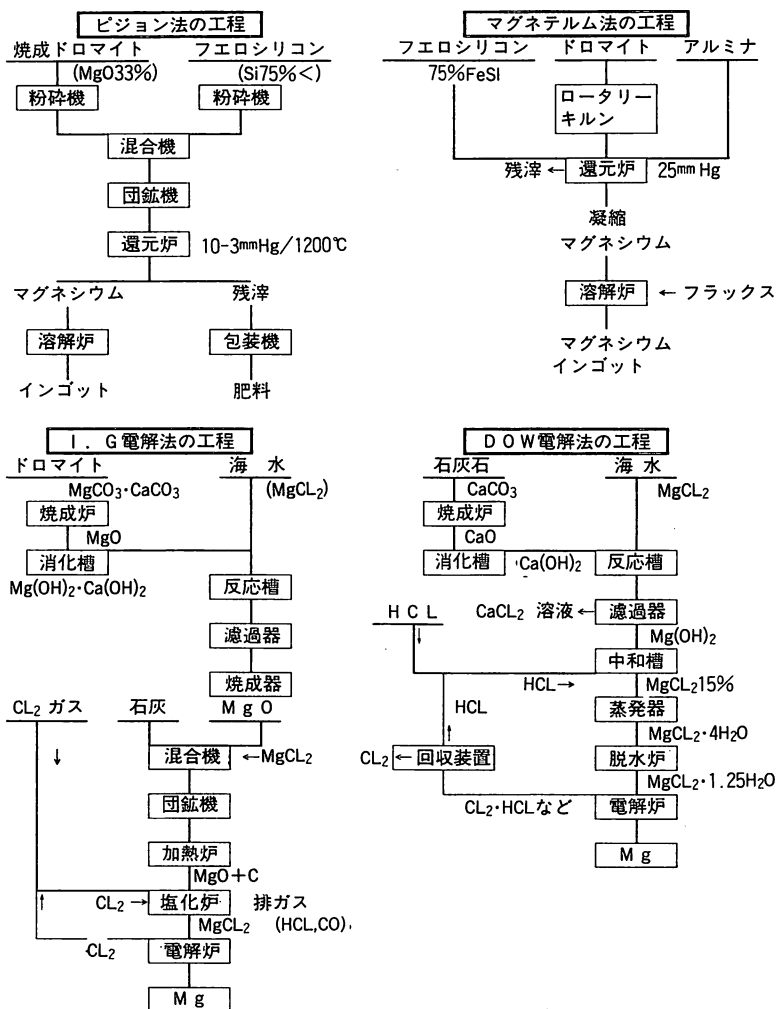


図-8 各製造法のフローシート

用途は少ない。従って、この塩素ガスを海水中に放棄しても採算に合う様な高効率・低エネルギーの製造方法が待たれる。

アルミニウムに対して、その比重差のままに、強度的にも3分の2の強度しか持たない材料であるマグネシウムは砂型鑄物の形態で使用される事が多かった。展伸材や圧延材材料に関する情報と知識が少ない為に技術者が自信を持って使用出来る環境にはなっていない。

特に、マグネシウム材料を使用する場合に必要な電気化学的な腐食を防ぐ為の手法が十分に理解されていない。不注意による火災や爆発を起こして人的損害を経験した過去の経験や瞬間的に燃焼させる為に酸化剤を添加して燃やしたフラッシュのイメージがマグネシウムは危険な物質であるとの迷信を造り上げてしまった。

マグネシウムは金属であり、溶けた状態とか、吸湿した微粉末でない限り決して危険な物では無い。

乾燥した粉末に火をつけても、粉殻が燃える様な状態で燃えるだけである。大量の水溶性切削油を使用して切削加工する様な場合は、切粉を燃やそうと思っても簡単には燃えるものではない。

今一つの問題点は供給される素材の形態がインゴットである事である。押出材料や圧延材料の供給はダウケミカルに注文して数週間ないし数ヶ月の納期が無ければ入手出来ない。又、アルミニウムの様に簡単に圧延や鍛造が出来ない(常温での沁り面は底面沁りのみ)ので加熱しつつ圧延するとか、所定の圧下率で加熱～鍛造を繰り返す必要がある。

しかし、押出部材は量がまとまれば鑄物よりもKg単価は安くなるので、今後はこの様な材料を使用する考えが必要であろう。

材料コストの面からは、現在のアルミニウムとはとても競争出来るものではない。異常な迄のアルミニウムの安値もどこまでも続くとは考えられないが、大量に使用される為には40万円/トン前後での安定供給が望まれる。

マグネシウム合金としての添加元素は: Li, Be, Al, Si, Ca, Mn, Zn, Zr, Ag, La, Ce, Nd, Th等であるが、耐食性に悪い影響を与えるFe, Cu, Ni, 等もごく少量含まれる。

Feはマンガンで処理する事によってFeAlMnの金属間化合物として沈降させて除去できるが、CuとNiはマグネシウムに良く溶け込むので、除去する方法が無い。従って、アルミニウム材料のスクラップの混入があってはならない。又Ni, Cr系のステンレスを工具として使用してはならない。耐食性を良くする為に、ダイカスト用のマグネシウム地金の中の鉄は40ppm以下に規制されている。このレベルに鉄分を押えて置く為には、再溶解時や再生溶解時に十分な注意が必要である。鑄物用合金では電位差の大きい添加元素が用いられるので規制は無い。

上述した様な理由から、マグネシウムを鑄造したり加工したり出来る業者は世界的にも少なく、裾野の狭い業界と言える。裾野の狭い事が技術情報の広がりを抑制し、誤った知識を是正出来ないままに放置する結果となっている。需要があれば増産と言うメーカーサイドと供給不安が無ければ使用したいと言うユーザーサイドの行き違いは直りそうもない。

製品の製造手法も従来のままの砂型鑄造法、ホットチャンバーダイカスト、コールドチャンバーダイカスト、低圧鑄造法等から、最近ではプラスチックの射出成型手法に似たチキソトロピックモルディング法の良さが提起されている。自動給湯機等のプロセスの自動化が完成し、材料としての量とコストが安定して、新手法による健全で安価な製品が供給される様になれば、マグネシウムにも、新しい未来が開けるであろう^{3,6)}。

参考文献

- 1) Principles of Magnesium Technology E. F. EMLEY pergamon Press 1966.
- 2) マグネシウム資源とマグネシウムの製造方法素材物性学雑誌 第3巻 鷹城一夫 1990.
- 3) マグネシウムマニュアル 日本マグネシウム協会1991年、1992年.
- 4) "From Past to Future" IMAレポート 1990 N. F. Petersen.
- 5) 科学百科事典 1990.
- 6) 現在用いられているマグネシウムの応用例 アルトピア 1985 Vol 15 No 7 July 鷹城一夫.
- 7) マグネシウムダイカストの動向調査研究 日本ダイカスト協会 平成5年3月.

書 評

(株)岩波書店発行

森 俊介 著

地球環境と資源問題

評者 齋 藤 雄 志*

Takeshi Saito

地球環境・資源問題の重要性はほとんどの人々が認め、この問題に関する一般社会の関心は強く、近年さまざまな出版物が発行されているが、日本人によって書かれたこの分野の著作で、単なる解説でなく分かりやすい専門的情報を提供する著書は必ずしも多くない。その一つの理由は地球環境・資源問題のような多分野にまたがる複合問題を総合的に分析できる研究者が我が国にはあまり多くないということがあるのかもしれない。

著者は、東京理科大学工学部経営工学科助教授でありシステム工学の見方から地球環境・資源問題に取り組む新進気鋭の研究者として知られている。地球環境・資源問題のような工学、経済学を含む学際的問題には複数の分野を統合するシステム工学のような総合的アプローチが不可欠である。本書はそれらの問題を分析するための経済学的視点とシステム工学的方法の提供に力点がおかれている。

評者も、21世紀になると地球環境・資源問題は今よりもずっと重要な問題としてクローズアップして来るものと予想しているが、社会がこれらの問題を考えるための適切な著作が不足している。このような問題は著者自身が述べているように専門家だけの問題ではない。社会全体が考えねばならない時期にきている。しかしこの問題は、経済、政治、技術、法制度の諸分野にまたがり、空間的・時間的広がり大きい問題であって、一般の人々にとっては大変捉えにくく、また偏った捉え方をしやすい分野である。われわれは総合的視点を学ぶ必要がある。本書はそのための貴重な1冊である。幸い、本書は難解な本ではなく地球環境・資源問題に関する豊富な解説を含む大変分かりやすい内容となっているので広範な学生、社会人におおいに役立つであろう。

本書はつぎのような構成になっている。

第1章 はじめにー問題の背景

第2章 地球環境と資源問題

第3章 地球環境と資源問題への経済学的接近

第4章 地球環境問題へのモデルアプローチ

第5章 技術の可能性ーなにができるか

第6章 地球環境と資源問題の今後

著者が、第1章で「問題の背景」として述べている点は、地球環境問題・資源問題の多面性と問題の難しさである。たとえば環境問題は経済成長そのものに関係しているというような点である。しかし容易に結論が出ないようなこの種の問題に対して「わからない間はなににも行動しない」とする従来の考えは、もやは限界にきているというのが著者の考えである。たしかに対象とする問題がローカルで小さな問題であった時代はそのような態度でも社会は全体として回復可能であったかもしれないが、地球環境・資源問題ではわれわれの考え方を変えなければならない。

第2章は、水、食料、森林、エネルギー等の資源の賦存・消費、および酸性雨、オゾン層破壊、地球温暖化などの環境問題の分かりやすい解説となっている。地球環境・資源問題は長期的な経済の問題でもある。第3章は、市場における効率的資源配分、外部経済と公共財、有限資源の需給と資源価格、課税等による地球環境問題への対策等の説明がなされている。第4章は、長期的な地球環境・資源問題を不確実性下の意志決定問題として検討する有力な道具としてのモデル分析の得失を述べている。この分野に関して著者は豊富な経験を持っている。

さらに本書では、上記のような問題に技術がどのような可能性を持っているかについても論じている。著者は悲観的考えから技術開発を怠ることは、過度の楽観以上に危険であると述べているが、長期的な技術開発とその位置づけの上で最も重要な態度であろう。本書は第13回エネルギーフォーラム賞優秀作を授賞している。

なお本書は全12巻の岩波書店「シリーズ現代の経済」のなかの1冊であるが、本書で触れている技術の可能性については同シリーズのなかの「先端技術と経済」(藤井美文・菊池純一著)が大変に参考になる。

* 専修大学経営学部教授

〒214川崎市多摩区東三田2-1-1

■ グループ紹介

東京電力株式会社 技術開発本部

技術開発本部の役割

電気事業においては、地球環境問題に関する議論の高まりに伴い、資源の有効かつクリーンな利用が重要な課題となる中で、着実に増大する電力需要に応じて将来も安定供給を確保していくため、また、多様化するお客様のニーズに応えるためには、幅広い技術開発がいっそう重要になっています。

こうした情勢のなかで、電気事業はこれまで培ってきた応用技術の実績に加え、基礎的な研究にも取り組む必要性が増えてきました。つまり、これまで電力会社として蓄積してきた技術をさらに充実させていくことに加えて、革新的技術へのブレークスルーのために、当社自らが、地球環境問題、超電導、人工知能、バイオなどに基礎的な段階から取り組むことが未来の電力技術のために不可欠になってきたのです。

このため、技術開発本部では、電力固有の分野はもちろんのこと、通信・システム土木、建築工学さらに機械・化学等あらゆる分野において、基礎研究から実用化開発まで幅広い技術開発に、従来以上に積極的に取り組んでおります。

さらに、先端技術の開発体制をいっそう強化するため、横浜市鶴見区に新たに技術開発センター（仮称）を建設する計画です。平成6年度に完成予定の同センターによって、現在分散している4研究所を集結して当社研究開発の拠点とし、国内外の研究者との相互交流の充実を図るなど、創造的研究活動にふさわしい環境づくりを目指しています。

技術開発の4つの柱

1. 安定供給、社会安全確保

将来の電気エネルギー源の確保や供給信頼度・安定性の確保など電気事業の基盤確保を目指します。

2. リサイクル社会実現への対応

環境と調和したリサイクル社会の実現を目指し、

地球環境・リサイクル問題に対応した技術開発に積極的に取り組みます。

3. コストダウン、業務効率化

各方面にわたってのコストダウン、業務効率化の技術を目指した技術開発に取り組みます。

4. お客様ニーズの高度化・多様化への対応

通信ネットワークは増大する情報量に対応するためデジタルネットワークへ移行しつつあり、これを利用したお客さまサービスの向上に努めていきます。

技術開発の体制

技術開発本部は開発計画部と4研究所（技術研究所、開発研究所、システム研究所、原子力研究所）から成り、本部外の各部および社外の研究機関とも協調をとりながら技術開発を進めています。研究所人員は、開発計画本部長以下約400名です。

開発計画部及び4研究所の役割と研究概要

1. 開発計画部

- ・長期経営課題に対応する技術開発計画の策定
- ・技術開発を効率的に推進するための社内外の調整
- ・国の研究および電力共通の研究への参加・協力
- ・海外の電力会社や研究機関との情報交換

2. 技術研究所

- ・新しい要素技術の基礎研究と評価（高温超電導／ガスタービン用セラミックスセラミックス／地球温暖化のメカニズム解明／CO₂回収・処理技術）
- ・試作段階での技術開発（光変成器／避雷碍子／電気自動車／配電作業マニピュレータ）
- ・電力基盤技術の研究蓄積（系統解析／絶縁設計／耐震設計／設備診断技術）

3. 開発研究所

- ・原子力以外の大型プロジェクト（燃料電池／石

炭ガス化／電力貯蔵用電池／自然エネルギー利用／新型ケーブル／送電線の雷害・雪害対策／新しい電気利用技術)

4. システム研究所

- ・コンピュータと通信網の新しい利用技術の研究 (エキスパートシステム／ニューラルネットワーク／基幹系統総合自動化／TV電話／画像交換システム／携帯電話)

5. 原子力研究所

- ・将来の原子力利用に関する研究 (高速増殖炉／軽水炉燃料の高燃焼度化／原子燃料サイクル／原子炉の廃止処理／材料／ヒューマンファクター)

所在地：〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

(文責：開発計画部

技術調査グループ主任 増田俊夫)

財団法人 地球環境センター

1. (財)地球環境センター設立の目的

(財)地球環境センター(以下、GEC)は、「大都市の環境保全を始めとする地球環境の保全に貢献すること」を目的として、平成4年1月28日に外務省、環境庁を主務官庁として設立されました。

本財団の主要な目的は、平成4年10月30日に大阪と滋賀に開設された国連環境計画(UNEP)国際環境技術センターのうち大阪事務所(以下、UNEPセンター大阪)の活動を支援することです。

UNEPセンター大阪は、日本を始めとする先進国が蓄積している都市環境問題の解決のための知識や技術を、発展途上国に移転するために設立されたものです。同センターの活動に対し、1960年代から70年代にかけて都市公害問題を克服するとともに、二度の石油危機をも省資源・省エネ技術の開発等により克服した日本の情報を提供していくことは非常に重要です。

GECは、国内の各種機関に蓄積されている技術や人材等の情報を統合し、UNEPセンター大阪の活動を通じて途上国に情報を提供するとともに、国内の各種機関との交流を効果的かつ円滑に行うことを目的と

しています。

2. (財)地球環境センターの概要

基本財産	13億円(平成5年3月)
職員数	16名(平成5年3月)
事業規模	2億9千万円(平成4年度)
所在地	大阪市鶴見区緑地公園2-110 (平成5年9月中旬より)
(現在)	大阪市中央区大手前1-2-15

3. (財)地球環境センターの事業内容

3.1 UNEPセンター大阪に対する支援

UNEPセンター大阪が実施する事業(4.参照)への支援や共同事業を実施します。また、UNEPセンター大阪の活動強化のために専門職員等の派遣を行うとともに建物施設の提供・維持管理を行っています。

3.2 環境保全技術・情報の収集と提供

日本にある環境関連技術・情報を集積し、途上国に提供します。そのために必要な国内の各種機関とのネットワークを構築するとともに、技術移転可能な技術などの調査を実施します。

3.3 研修, セミナー, シンポジウム

国際協力事業団 (JICA) 等から大気汚染防止集団技術研修などの事業を受託するなど, 技術移転のための研修を実施するとともに, 大都市環境問題を始めとする地球環境問題についてのセミナー, シンポジウムを実施します。

3.4 広報, 啓発

広報, 年報の発行等により, 専門家のみならず一般市民も含めた環境問題に対する意識の啓発を図ります。

4. UNEP国際環境技術センターの事業内容

平成2年5月のUNEP第16回管理理事会で, UNEP国際環境技術センターの設置が採択されました。このセンターは, 大阪市, 滋賀県の誘致の提案を受けて, 外務省, 環境庁が途上国への環境保全に関する技術移転を進める中核機関の日本設立をUNEPに働きかけていたもので, 大都市環境の総合管理に関する技術を大阪事務所, 湖沼環境保全に関する技術を滋賀事務所

所で扱います。

UNEPセンター大阪は, 次の業務を実施します。

4.1 環境情報の提供

途上国に対して都市環境管理 (大気汚染防止, 水質汚濁, 都市廃棄物等) 技術等に関する必要な情報の提

供を行います。

4.2 研修

途上国の政府機関において環境管理に携わる職員などに対して, 環境保全技術並びに政策手段等に関する研修を行います。

4.3 コンサルティング

途上国からの要請に応じてコンサルティングチームの派遣などを行い, 課題解決の支援を図ります。

4.4 調査研究

世界の大都市における都市環境問題のケーススタディや効果的な技術移転の方法論の研究を行います。

5. UNEPセンター大阪の施設について

GECおよびUNEPセンター大阪は, 9月中旬より大阪市の鶴見緑地内に完成する施設に移転します。本施設は, 建設設備上の工夫として太陽電池, 燃料電池, ごみ発電電力を利用する一方, 二重壁の利用等省エネルギー効果の高い施設を目指して建設されたものです。

所在地: 大阪市中央区大手前1-2-15

(文責: 事業部事業課長代理 山本 政)

協賛行事ごあんない

「第2回微粒化シンポジウム」ご案内

- | | | |
|---------|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1. 主催 | 日本液体微粒化学会 | 5. 参加申込方法 |
| 2. 協賛 | 日本エネルギー学会, 日本機械学会他 | ①参加費……会員6,000円 (事前申込5,000円) |
| 3. 期日 | 1993年12月21日 (火) ~22日 (水) | 非会員9,000円 (事前申込8,000円) |
| 4. 場所 | 慶応義塾大学理工学部矢上台校舎
(横浜市港北区日吉3-14-1) | 学生2,000円 |
| 5. 募集講演 | ①研究講演 ②速報講演
③デモンストレーション・パネル講演 | 懇親会5,000円 (学生は無料) |
| | ※講演申込締切 1993年9月30日 (木) | ②参加申込締切……1993年11月30日 (火) |

■問合先 〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

慶応義塾大学 理工学部 機械工学科 徳岡研究室 気付

「日本液体微粒化学会」東京事務局 担当 徳岡 直静

TEL 045-563-1141 (Ex. 3196) FAX 045-563-5943

((((((((技術・行政情報)))))))

産学官によるエコマテリアル研究がスタート

1. はじめに

科学技術庁は、1993年度から産学官共同により、環境と人間に優しいエコマテリアルの開発に着手する。このプロジェクトは、従来の環境問題に対応する技術開発にとどまらず、積極的に問題を解決していく新しい材料開発を志すものである。これまでの材料研究に含まれない研究要素を中心に据え、エコバランス分析・評価、材料のリサイクルデザインなど、新しい概念を掲げている。

研究は、93年度科学技術振興調整費の新規プロジェクト「材料のエコマテリアル化のための評価・設計技術の確立に関する研究」で、プロジェクトには、国立試験研究機関と大学に加え、鉄鋼、電気メーカーなどが参加する。プロジェクトは平成5年度からの5カ年計画で、総額約18億円の予算である。またプロジェクトを積極的に推進すると同時に、エコマテリアルの実現を図るために新たに「エコマテリアル研究会」を発足し、エコマテリアルに関連する内外の情報を収集し、産学官の交流を活発にする。ここでは、エコマテリアルの新規プロジェクトと「エコマテリアル研究会」の内容を紹介する。

2. 科学技術庁「エコマテリアル研究」

2.1 研究の趣旨

環境と調和のとれた物質・材料系科学技術の確立は、21世紀における人類の存続と活動すべての基礎を構築する上で重要な課題である。深刻化する地球環境問題に対応し、人間活動の基礎になっている「材料」の新しいあり方が求められている。本研究では、材料に基本的に要求される機能として、人間活動領域を広げ、利便性を増すだけでなく、環境との調和が重要という視点から、材料のエコマテリアル化のために、材料の製造から使用、廃棄などの全過程における環境負担性の総合的な評価方法を確立するとともに、リサイクルを前提とした材料設計、自然帰属性の優れた材料・物質創製設計などの基本指針を得る。

2.2 研究概要

(1) マテリアルズエコロジー確立のためのアセスメント手法に関する研究

材料の全ライフサイクルにおける物質収支、エネルギー消費、環境負担性などを総合的に評価するシステムの構築を図る。第1期では、既存関連データベースの調査等に基づき、エコバランス評価ソフト、エコマテリアルデータベースの基盤の確立を図る。

①総合システム分析手法の開発

環境負担性の総合評価分析手法の開発、物質・エネルギー収支、材料性能などのデータベース化の研究を行う。

a. 環境負担性評価システム構築のため基礎調査研究

材料研究者を中心に、社会学者等も含めた調査委員会を組織し、各国の関連動向を調査するとともに環境負担性の総合評価におけるガイドラインの設定を図る。

b. 材料のエコバランス評価手法の確立に関する研究

社会的インフラ、大衆消費材等におけるエコバランスの評価ソフト開発を行う。

i. 社会的インフラ

発電プラント等における材料使用のエコバランス評価手法を検討する。

ロ. 大衆消費材

家電製品等の大衆消費材のエコバランス評価手法を検討する。

c. エコマテリアルデータベース基盤確立に関する研究

エコマテリアルデータベースの基本形式の検討、材料データの収集とデータベース化を図る。

②材料のエコバランス改善のため基礎的研究

エコバランス改善のケーススタディとして、発電プラントにおける高温用構造材料を対象とした検討を行う。第1期では、エコバランス評価に必要な高温長時間特性を支配する因子の抽出を行う。

(((((技術・行政情報)))))

- a. 金属材料の高温強度支配因子の解明に関する研究
金属材料の高温強度を支配する因子を検討する。
イ. 高温用固溶合金の構造設計に関する研究
ロ. 実用金属材料の高温強度支配因子に関する研究
- b. 金属-セラミックス材の高温特性
セラミックスコーティングの高温特性劣化要因を検討する。
- c. セラミックスの高温力学特性改善のための基礎的研究
セラミックスの高温特性を支配する組織因子を解明する。
- (2) 物質循環を指向したリサイクル材料設計技術に関する研究
材料のエコマテリアル化のためにリサイクルを前提とした材料設計を検討する。第1期では、大量生産材を対象に、組成変動受容性に富む汎用合金、単純組成で広範な機能を発揮できる複相合金、リサイクル容易な新複合材料などの設計基本指針を確立する。
- ① 微細組織制御によるリサイクル構造用鋼の材料設計に関する研究
リサイクル容易な単純組成において広範な特性を発現するためには、微視組織制御を最大限に発揮する必要がある。第1期では、諸特性と微視組織の関係を明らかにする。
- a. 複相組織の定量化法に関する研究
組織の定量化方法を考案し、成形性（強度、延性）と微視組織因子との関係を明らかにする。
- b. 複相組織の限界特性に関する研究
複相組織における組織因子と破壊靱性値、疲労強度などの限界特性との関係を明らかにする。
- c. 複相組織の制振特性に関する研究
組織因子と制振性の関係を体系化し、制振性鋼材の基本仕様を提案する。
- d. 介在物分散制御による微視組織制御
酸化物系介在物を利用して、強靱化を図る制御技術を開発する。
- ② スクラップ利用による汎用合金製造の基盤確立に関する研究
スクラップを利用し、比較的広範囲な組成範囲で、必要特性を発揮できる安価な合金製造方法の基盤を確立する。
- a. チタン合金
スクラップを原料に、安価で適正な性質を持つチタン合金溶製法を検討する。
- イ. 低合金系材料
ロ. 高合金系材料
- b. 銅合金
スクラップ中不純物を効率良く除去するためのプロセスを検討する。
- ③ 複合材料のリサイクル材料設計技術に関する研究
界面構造設計等の新しい発想に基づき、リサイクル性に優れた複合材料の開発手法を検討する。
- a. リサイクル建築用複合材料の設計技術に関する研究
コンクリートおよび強化プラスチックによるリサイクル性に優れた超軽量・高強度プレキャスト部材の開発のための基本設計を行う。
- b. 土木資材に適合した再生プラスチック材料の設計技術に関する研究
廃プラスチック等を原料とする耐久性、解体容易性に優れた土木資材開発のための製造条件等の検討を行う。
- c. リサイクル複合化ポリマー素材に関する研究
加熱時単相であるが冷却（使用）時に液晶ポリマーが晶出し、必要強度を発現するリサイクル熱可塑性ポリマー素材開発のための基礎研究を行う。
- d. 複合化ポリマーのリサイクル容易化に関する研究
塩ビなどの複合化ポリマーを、有毒性物質を回収し高分子モノマーとして原料リサイクルするために、界面構造制御による素材設計および原料リサイクルプロセス設計を行う。
- (3) 自然調和を指向した自然融合物質・材料技術に関する研究
自然や生命が時間をかけて培ってきた現象や反応を材料科学に取り入れ、環境との調和性に優れた物質・

(((((技術・行政情報)))))

材料技術を創製する。そのために、無機・合成系と自然・生物系の境界に位置する新たな材料分野を対象に、構造、機能、反応、特性における相互浸透技術を検討する。

①生物合成反応利用高分子設計

生物高分子物質の構造・物性・機能を解明することによって、地球環境と調和する高分子素材を分子設計し、優れた物性を有する自然融合高分子材料を微生物合成する。

②天然素材の構造形成過程を組み込んだ生物アパタイト模倣材料の創製

生態Ca系物質とくに生物アパタイトを模倣したCa欠損アパタイトの合成および成形技術を確認し、環境同化性無機材料を創製する。

③木質材料を用いるメゾミッシブル複合材料の創製

a. 化学修飾による高耐久性・高性能木質材料の創製

セルロース、ヘミセルロース、リグニンの3成分から構成される木質材料の化学反応特性を解明することによって、特定成分に各種官能基を導入する反応制御技術を確認し、高耐久・高性能木質材料を創製する。

b. 表面改質による高性能・高機能木質材料の創製

多種の化合物を用いて木質材料表面をプラズマ処理することによって、新たな機能と性能を付与した木質材料を創製する。

④生体模倣化学に基づく分離濃縮プロセスの設計に関する研究

生体高分子における化学的相互作用を解明し、生体物質に見られる分子・イオンの取り込み・濃縮作用を模倣した材料プロセスの設計指針を検討する。

a. 金属分離プロセスへの高分子ゲルの応用に関する研究

生体を構成する高分子ゲルの金属イオン取り込み・濃縮能力の利用を検討する。

b. 生体系の輸送現象を模倣した分離プロセスに関する研究

金属ポリフィリン錯体を利用した陰イオン選択分離プロセスを検討する。

3. エコマテリアル研究会

3.1 目的

研究会は、国内の産学官および海外の諸機関との交流により、エコマテリアルに関する異分野を含めた技術情報の収集、研究開発課題の探索、会員相互の情報交換、研究成果・知識の普及等を図ることを目的とする。

3.2 研究会活動

研究会は、以下の活動を行なう。

①国が行う研究開発プロジェクトをバックアップし、関連する情報を会員に公開する。

科学技術振興調整費総合研究の新規プロジェクト『材料のエコマテリアル化のための評価・設計技術の確立に関する研究』が、平成5年度から5か年間の予定でスタートする。これに関連してその内容、成果などの内部情報を会員に公開するとともに、研究会活動に反映させる。

②プロジェクトに関連するより広い領域の情報収集、情報分析、調査研究などを行う。

国のプロジェクトは比較的狭い領域に絞って実施されるが、プロジェクトの波及効果を高めるため、技術や工学の枠に納まり難い「エコマテリアル」テーマの本質を取り入れ、より広範な社会・経済学の領域も視野に入れた研究者、技術者の参加を求め、情報収集、情勢分析、調査などを実施する。結果はできるだけ会員に還元する。

③会員に対する情報やサロンの提供

ワークショップ：プロジェクトの内容紹介、調査結果の報告、特定問題に関する会員相互の討論（サロン）、などを行うための会員だけが参加できる年間数回の定期的会合。

シンポジウム：年1～2回開催され、ワークショップより一般的内容に限定した研究会活動のPRを兼ねた不定期的会合。原則としては非会員にも有料で公開される。

国際ワークショップ：エコバランス、リサイクルデザイン、温暖化適応、環境修復などのテーマについて適当な時期に小規模ワークショップを開催する。

報告書などの出版：全企業分野におけるエコマテ

((((**技術・行政情報**))))

リアル技術の最新情報を集録したニュースレターや、調査内容などを報告書としてまとめ、会員に送付する。

委員会や分科会への参加：より深い調査検討作業の現場を経験したい会員は、自ら上記委員会やその分科会に委員として参加し、多方面の専門家と直接対話する機会を持つことができる。

尚、研究会の事務局は下記協会に設置されている。

〒105 東京都港区虎ノ門1-2-8

虎ノ門琴平会館ビル

(財)未踏科学技術協会 内

エコマテリアル研究会 事務局

TEL 03-3503-4681 FAX 03-3597-0535

(財)電力中央研究所 経済社会研究所

技術評価グループリーダー

研究主幹 内山洋司)

他団体ニュース

第2回「21世紀の科学技術哲学討論会」

〔主催〕研究・技術計画学会関西支部及び
関西エネルギー・リサイクル科学研究
振興財団

〔後援〕大阪科学技術センター

〔日時〕平成5年12月7日(火) 13:30~17:00

〔場所〕三田出版会会議室
(大阪市北区中崎西2丁目4-12
梅田センタービル)

〔テーマ〕「繊維に関する開発研究の将来」

〔定員〕80名

〔申込締切日〕10月15日(金)

〔参加費〕無 料

■参加申し込み及び問合せ先

(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団

〒530 大阪市北区中之島3-6-32

ダイビル823号

TEL 06-444-2776



廃棄物からの低濃度レア金属の回収

Dilute Rare-Metal Recovery from Waste Materials

—— 一材料屋の夢 ——

中 村 治*

Osamu Nakamura

ニッケルやモリブデン等のレア金属は電子機器、原子力、航空・宇宙産業等に用いられる材料の機能発現のため、近代社会において不可欠のものとなっている。これらの使用量は国民一人当たりのGNPと深く関わっており、今後においてもますますその需要量が増大することが見込まれている。しかしながら、それらの鉱石埋蔵量はわが国においては皆無に等しいばかりでなく、全地球的規模においても不足することは目に見えている。わが国はこれら金属の大消費国であるので資源確保に関する国際的役割として、探鉱技術の高度化、備蓄、発展途上国に対する環境問題への対応をも含めた技術移転等がなされているが、それに加えて廃棄物の再資源化（リサイクル）もそのための有効な手段と考えられる。

レア金属は、いわゆる機能材料としてだけ使われているのではなく、基盤産業における鉄とともに使われ特性向上に役立っている。構造材に使用される場合、使用分率は少なく、しかも均一分布状態で使用されているので、使用済廃棄物をレア金属鉱石として評価する場合、天然鉱石より品質が劣るものが多い。それゆえ、現在ではそこからレア金属を回収するのは採算に合わないことは明白である。再資源化という命題が与えられた場合、取り柄と言えば「どの製品、材料に“総量”としてどういう元素が何グラム含まれているか」という情報があるのみである。こういうエントロピーの大きい希薄物から有用元素を取り出すことを得意としているのは“マクスウェルの悪魔”と呼ばれる架空小動物(?)であるが、われわれはこれを飼いならしていないため、その有用性を実証するわけにはいかない。それならば、われわれの科学技術でそれを代行できないかと考えるのが研究者たるものなのである。以下は小生の乏しい知識から析出された妄想であり、これに興味を持つ諸賢への話題提供となれば幸いである。

ある物質を精製するには、これから精製しようとする母体物質と、それに含まれている有用物質（多くの人はこれを不純物と呼ぶ。）の間の物理的・化学的性質の相違、あるいはその相互作用の有無を利用すればよい。これらを効率的に分離するにはそれらの性質が大きく異なっていることが必要である。すなわち、蒸留、融解、凝固、電気分解、イオン交換、拡散等であり、さらにこれらのいくつかを組み合わせる用いることもある。これらの操作は、母体物質をより純度の高いものにしようという試みであって、取り除かれるべき不純物側にあまり目が行っていなかった。

初期の頃のセラミックスの研究においては、コスト面で有利な多結晶焼結体でいかに単結晶の特性を現出させるか（単結晶指向型）が命題であり、粒界特性の寄与を極力避けることに努力が払われてきた。ところが近年、材料に対し多様性が要求されるようになると、粒界（界面）こそが機能の発現箇所という認識が高まり、この部分の研究が多くなってきた。

上記二例の認識を援用し、希薄有用元素（レア金属）の回収における技術開発を別の観点から見た物質の精製と捉えることはできないだろうか。一例を挙げるなら、偏析係数（分配係数）の小さなものについては帯熔融（ゾーンメルティング）法が応用できないだろうか。また、われわれは、材料の特性を向上させ、しかも信頼性を高めるために、有用元素を材料内に均質分散化させる努力を行っている。ところが、この目的を妨害しているものは粒界であり、転位であり、格子欠陥である。すなわち、そこは不純物がよく溜まる場所として知られている。それならそれを逆に利用して、不純物（＝有用元素）を捕集する手段として採用したらどうか。実用材料は、こういう不純物偏析が起らないように改善、工夫されたものである。それゆえ、それらの材料内で原子の移動を積極的に行わせ、さらにあるところに集中させるのは至難の業と思われる。しかしながら、目的物の捕集材と良好な「界面」を形成し、それにより有用元素を集める手法の手

* 大阪工業技術試験所 無機機能材料部粉体材料研究室長
〒563 池田市緑丘1-8-31

本がないわけではない。アルカリイオン導電体を湿ったCO₂(捕集材)雰囲気内に置くと、まず表面のアルカリイオンが化学反応により炭酸塩となり、材料表面層のアルカリイオン濃度が下がる。その結果、材料中心部に向かって濃度勾配ができ、これが推進源となり、材料中の全アルカリイオンが材料表面に抽出される。これは自由エネルギー減少の方向であるので、自然の

摂理にかなっており、考えようによっては、金属の還元や高均質高配向分散よりたやすいことかもしれない。

このように従来技術の逆転の発想は、わが国の資源問題、地球環境問題、さらには波及効果として材料調製のコストダウンに関する解決の糸口として十分期待に応えうるものとする。

協賛行事ごあんない

第22回ガスタービンセミナー

「運転信頼性の面からみたガスタービンへの期待と提言」 (ユーザから、メーカから)

1. 日 時 平成6年1月20日(木)・21日(金)

2. 場 所 川崎産業振興会館
(川崎市幸区堀川町66-20)

3. 講演並びに講師 (予定)

- ①発電用大型コンバインドサイクルプラント
……中部電力 大原 久宣
- ②ガスタービン利用発電の運転実績と今後の動向
……東京電力 相沢 善吾
- ③大型ガスタービンの運転信頼性
……三菱重工 未 定
- ④機械駆動用ガスタービン
……日 立 龍花 清作
- ⑤新宿新都心地域冷暖房における
コージェネレーションについて
……東京ガス 須佐 真明

⑥ガスタービンリパワリングの運転実績について

……大阪ガス 柳原 正直

⑦小型ガスタービンの運転信頼性

……川崎重工 北詰 滋樹

⑧航空機エンジンの信頼性管理について

……全日空 杉浦 重泰

4. 事務局並びにセミナー担当委員

・事務局 東京都新宿区西新宿7-5-13

第3工新ビル

(株)日本ガスタービン学会

TEL 03-3365-0095, FAX 03-3365-0387

・担当委員 ガスタービン学会企画理事

横浜国立大学 秋葉 雅史

TEL 045-335-1451, FAX 045-337-7166

編集委員会便り

本号では「太陽電池実用化の取り組み」を特集テーマとして取り上げることとなった。地球環境問題の顕在化に伴い、環境保全に向けた取り組みの必要性から、クリーンなエネルギー源としての太陽光発電に対する注目と期待が高まっている。このような状況から、太陽電池の実用化・普及拡大を図っていくことが重要な課題となっており、本誌の特集テーマとして取り上げてはどうかと提案していたところ、越後委員長より検討するようにと仰せつかった次第である。

さて、太陽電池は1954年Pearsonらにより発明され、研究開発がスタートした。我が国でも1959年頃から研究開発が行われ、1960年代に入り灯台や山間僻地等への実用化が始まった。その後、1973年に第1次石油危機が起こり、これを契機とし、翌年から通産省工業技術院のサンシャイン計画がスタートし、産官学あげての研究・実用化開発が大規模に精力的に行われるようになった。この間、1980年に新エネルギー開発の中核的な推進母体として、新エネルギー総合開発機構（現新エネルギー・産業技術総合開発機構、NEDO）が設立され、また、1990年には太陽光発電技術研究組合が設立され、NEDO委託研究の効率的な推進が図られている。これらの取り組みにより、高効率化、低価格化、システム技術等で多くの成果があげられ、太陽光発電技術が大きく進展した。

また同時に、実用化・普及に向け、法制度の整備や系統連系ガイドラインの策定、新エネルギー発電フィールドテスト事業や戸建住宅への導入促進のための普及条件整備調査、技術確立実証試験等の実施、電力会社による新エネルギー等による自家発電からの余剰電力買い取り制度の発足等太陽光発電に係わる諸政策が講じられている。さらに今年度からは、これまでのサンシャイン計画、ムーンライト計画並びに地球環境技術開発を合わせてニューサンシャイン計画（エネルギ

ー・環境領域総合技術開発推進計画）として革新技術開発、国際大型共同研究、適性技術共同研究の3つの技術体系で推進されるようになった。

このように、各方面での多くの取り組みが精力的に進められており、これらの取り組みが功を奏し、太陽光発電システムの導入が促進され、普及拡大が加速的に進んでいくものと期待されている。また、今年は太陽光発電の大規模普及に向けた実用化元年とも言われている。

このような状況下で、「太陽電池実用化の取り組み」を特集テーマとして取り上げられることは、タイムリーで大変意義深いことであり、読者にとって少なからず益することであると信じているところである。

今回の特集では、総論としての太陽電池開発の現状と今後の展開、セルの高効率化技術、低価格化のポイントの1つであるSi材料と基板技術の開発動向、これからの応用分野の中心技術となる系統連系制御技術および普及拡大への取り組み状況等の内容で、いずれも今後の実用化を促進していくうえで非常に重要なテーマ、課題である。執筆陣はいずれも第一線でご活躍中で、それぞれの分野での第一人者であり、それぞれの御仕事でご多忙を極めておられる方々ばかりであるが、本特集の主旨と意義を御理解賜り、快く執筆を御承諾頂けたことは大変幸いであった。

なお、本特集を検討するにあたっては、内山委員にもご尽力いただいた。この紙面をお借りして、執筆いただいた方々とともに心からお礼を申し上げる次第である。

沢井啓安

(シャープ㈱電子部品事業本部)

太陽電池HBプロジェクトチームチーフ)

'93(後半)内外のエネルギー・資源関連行事日程表

会 議 名	開 催 日	会 場	備考 (主催者, 問合せ先, 内容など)
44th ISE Meeting	Sep. 5-10	Berlin, Germany	DECHEMA Abt. Tagungen Theodor-Heuss-Allee 25 P. O. Box 970146 D-6000 Frankfurt/Main 97 Germany Tel 069-7564-242/241/280 Fax 069-7564-201
JSME-ASME 動力エネルギー国際会議 (ICOPE)	Sep. 12-16	東京	主催: 日本機械学会 問合せ先: 同上学会事務局 Tel 03-3379-6781 Fax 03-3379-0934
International Conference on Coal Science	Sep. 12-17	Banff, Alberta, Canada	7th ICCS Conference Office P. O. Box 4520, Station Calgary, Alberta Canada T2T 5N3 Tel 403-244-4487 Fax 403-244-2340
10th Annual International Pittsburgh Coal Conference	Sep. 20-24	Pittsburgh Green Tree Marriott, Pittsburgh, PA, USA	Mrs. Ann Mc Donald, Program Secretary The Pittsburgh Coal Conference University of Pittsburgh 1140 Benedum Hall Pittsburgh, PA 15261 Tel 412-624-7440 Fax 412-624-1480
15th International Telecommunication Energy Conference	Sep. 27-30	Paris, France	Secretariat General INTELEC 93 SEE 48, rue de la Procession F-75724 Paris Cedex 15 France Fax 33-1-44-49-60-44
第4回電力貯蔵用電池国際会議	Sep. 27- Oct. 1	Berlin, Germany	BEWAG, EPRI, NEDO 共催
Véhicules Propres-Clean Vehicles, Realities and Prospects of the Electric Vehicle	Oct. 4-8	La Rochelle, France	VP/CV '93 Secrétariat SEE: 48, rue de la Procession F-75724 Paris Cedex 15 France Fax 33-1-44-49-60-44
「太陽光発電システムの基礎と応用」講習会	Oct. 6	工学院大学, 東京	主催: 日本太陽エネルギー学会 問合せ先: 同上学会 Tel 03-3368-7129 Fax 03-3368-7527
第13回新エネルギー産業シンポジウム	Oct. 6-8	経団連会館, 東京	主催: 新エネルギー財団 (NEF) 問合せ先: 同上財団事務局 Tel 03-3501-8437 Fax 03-3503-0566 (ただし本年7月下旬に事務所移転で変更予定。)
第8回ガスタービン秋季講演会	Oct. 7	盛岡	主催: 日本ガスタービン学会 問合せ先: 同上学会事務局 Tel 03-3365-0095 Fax 03-3365-0387
GRC '93大会	Oct. 10-13	San Francisco, USA	主催: Geothermal Resources Council (GRC) 問合せ先: GRC事務局 P. O. Box 1350, Davis, CA95617
Electrochemical Society 184th Meeting	Oct. 10-15	New Orleans, Louisiana, USA	Electrochemical Society Inc 10 South Main st Pennington New Jersey 08534-2896 USA
資源・素材学会 (資源素材 '93) 秋季大会	Oct. 12-14	九州大学工学部, 福岡	資源・素材学会 秋季大会係 (東京都港区赤坂9-6-41, Tel 03-3402-0541)

会 議 名	開 催 日	会 場	備 考 (主催者, 問合せ先, 内容など)
2nd International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology	Oct. 14-16	Seoul, 韓国	延世大学校金属工学科 (呉在賢教授) 韓国ソウル特別市, 西大西大門区新村洞134 Tel 02-365-6640 Fax 02-312-5375
「複合化によるエネルギー有効利用」講習会	Oct. 15-16	東京	主催: 日本機械学会 問合せ先: 同上学会事務局 Tel 03-3379-6781 Fax 03-3379-0934
平成5年度火力原子力発電大会	Oct. 20-22	福岡サンパレス, 福岡	主催: (財)火力原子力発電技術協会 問合せ先: 同上協会事務局 Tel 03-3592-0380 (代表) Fax 03-3592-0335
「資源リサイクル問題の核心」講習会	Oct. 22	千里ライフサイエンスセンター, サイエンスホール, 大阪	主催: エネルギー・資源学会
Tokyo Conference on "Global Environment, Energy, and Economic Development"	Oct. 25-27	国連大学本部, 東京	主催: 国際連合大学, (財)国際開発センター
1st International Conference on Processing Materials for Properties (PMP '93)	Nov. 7-10	Honolulu, Hawaii, USA	The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), Warrendale, PA, USA Tel 412-776-9080 日本側連絡所: 資源・素材学会, PMP '93係 Tel 03-3402-0541
第12回熱電変換国際会議 (XII ICT)	Nov. 9-11	バンフィコ横浜 国際平和会議場	問合せ先: 湘南工科大学電気工学科 梶川武信 Tel 0466-34-4111
International Symposium on CO ₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy	Nov. 29 -Dec. 1	東京工業大学 百年記念館 フェライト会議室	・招待講演22件 (海外11件) のほか, 一般講演とポスターセッションから構成されます。 ・発表希望者は, 下記宛 9月30日 (水) までに申込下さい。 ・問合せ先...〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学炭素循環素材研究センター 玉浦 裕 (Tel 03-3726-1111, 内線 3292)
日本地熱学会	Nov. 30 -Dec. 2	東京大学	主催: 日本地熱学会 問合せ先: 同上学会事務局 Tel 03-5689-3471 Fax 03-3812-7737
1st International Conference on Combined Cycle Power Generation	Jan. 6-8	Calcutta, India	主催: ASME 問合せ先: 日本機械学会事務局 Tel 03-3379-6781 Fax 03-3379-0934
第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス	Jan. 27-28	虎ノ門パストラル, 東京	主催: エネルギー・資源学会 共催: (財)電力中央研究所, (財)日本エネルギー経済研究所, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)エネルギー総合工学研究所, 日本コージェネレーション研究会
Society of Mining Engineers (SME) Annual Meeting	Feb. 14-17	Albuquerque, New Mexico, USA	Meeting Dept. SME Inc. P. O. Box 625002 Littleton, CO, USA

平成5年度第2回研究部会（見学会併催）

去る6月18日（金）13：30～17：00（財）電力中央研究所，我孫子研究所にて標記研究部会が開催され24名が参加し，好評であった．今回は，コーディネーターを（財）電力中央研究所の山地憲治氏にお願いし，初めに，「高温岩体発電について」と題して，（財）電力中央研究所我孫子研究所特任研究員の堀 義直氏からスピーチを頂いた．この後，見学に移り，高温岩体発電（展示室），圧縮空気貯蔵発電（展示室），野菜工場，CO₂深海底貯留等の設備を見学した．講演，見学とも質疑応答が盛んに行われ，大変有意義であった．



平成5年度「エネルギー基礎講座——先端技術者研修——」

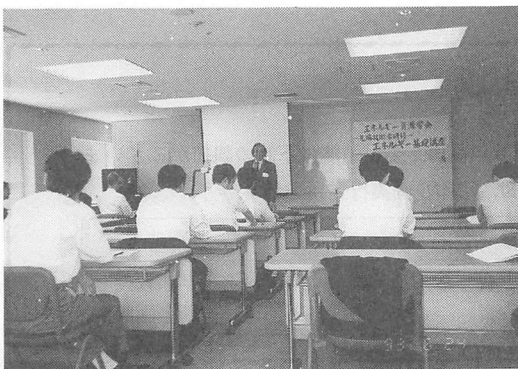
去る6月23日（水）～25日（金）に巨り千里ライフサイエンスセンター901号にて，標記講座が開催され，29名が参加した．講座プログラムは下記のようにっており，活発に質疑応答が交わされ盛況であった．

25日（金）には，講座後，修了証書授与，懇親会と開催され，講義を離れた親交を深めた．尚，テキストは，若干在庫がございますので，御希望の方は事務局までお申し込み下さい．

（A4版133頁，会員価格4,200円（税込））

・講座プログラム

1. 化学エネルギーと電気エネルギーの間の変換（京都大学 竹原善一郎教授）
2. 伝熱工学（京都大学 鈴木健二郎教授）
3. 電気工学（京都大学 岡田 隆夫教授）
4. 熱エネルギーと電気エネルギーの間の変換（山口大学 松原 覚衛教授）
5. 光エネルギーと電気エネルギーの間の変換（大阪大学名誉教授 坪村 宏先生）
6. 熱力学の基礎（京都大学 荻野 文丸教授）
7. エネルギーと環境（大阪大学 鈴木 胖教授）
8. エネルギー資源（京都大学 西山 孝助教授）
9. エネルギーと経済（神戸大学 天野 明弘教授）



■人事異動

◎本学会役員・委員に下記の異動があった。

願 問

- ・末廣 恵雄氏 資源エネルギー庁長官官房審議官 → 並木 徹氏 同左
- ・杉本 忠利氏 農林水産省農林水産技術会議研究総務官 → 三輪春太郎氏 同左

理 事

- ・小川寿美雄氏 電源開発(株)技術開発部長 → 山保 太郎氏 同左
- ・岸野 卯吉氏 石川島播磨重工業(株)専務取締役 → 野島 陸郎氏
取締役, エネルギー・プラント事業本部長
- ・丹羽 高尚氏 三菱重工業(株)副社長, 原動機事業本部長 → 永井 康男氏
常務取締役, 原動機事業本部長
- ・石井 國義氏 九州電力(株)常務取締役 → 岡 範彦氏 理事, 火力部長
- ・佐々木康夫氏 日本原子力発電(株)取締役 → 塚田 浩司氏 同左

企画実行委員 (編集実行委員兼任)

- ・上田 雅美氏 東京電力(株)開発計画部副部長 → 山本 隆彦氏 同左

企画実行委員

- ・山岸 一夫氏 東京ガス(株)研究推進部担当部長 → 服部 達雄氏 技術企画部担当部長
- ・正田 尚氏 中部電力(株)研究企画部担当課長 → 脇田 孝仁氏 同左

編集実行委員

- ・服部 正策氏 (株)ユアサコーポレーション最高技術顧問 → 岩淵 純允氏 理事, 技術企画部部长

企画編集委員

- ・植松 睦夫氏 ユニチカ(株)生産技術部長 → 川上 五郎氏 同左
- ・北川 利夫氏 (株)タクマ 技術本部取締役技術統轄部長 → 阿江 貞章氏 経営企画本部技術統轄部長
- ・竹本 靖氏 (株)大林組 技術研究所環境研究室長 → 宮川 保之氏 同左
- ・浜野 義光氏 京セラ(株)総合研究所 専務取締役所長 → 古賀 和憲氏 京セラ(株)総合研究所 副所長

お詫びと訂正

■前号 (Vol. 14-No. 4) 会報 (ix), (x) の平成5年役員、委員名簿に下記の誤植がございましたので、お詫び申し上げます。(◎印編集実行委員, ○印企画実行委員を示す。)

(誤)	(正)
◎石 谷 久 東京大学工学部教授	○石 谷 久 東京大学工学部教授
○秦 浩 之 東邦ガス技術企画部長	○秦 浩 之 東邦ガス技術企画部長

受託研究報告

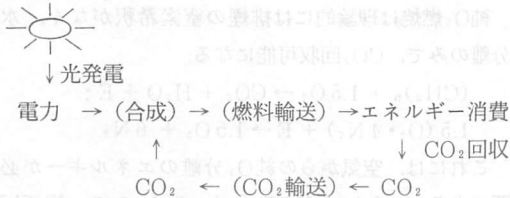
自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステム可能性調査

委 託 先：新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) & 地球環境産業技術研究機構 (RITE)
 調査期間：平成2年12月～平成5年3月

1. 研究の目的

地球温暖化を防止するための国際的要請として、21世紀中にCO₂の排出を半分以上に削減することが必要とされている。そしてCO₂の発生源である化石燃料は今日の主たるエネルギー源であるため、CO₂抑制とエネルギー源確保の問題は不可分である。

CO₂の大幅な削減は(1)省エネルギー、(2)燃料転換、(3)新エネルギー開発、(4)CO₂回収・貯蔵、などといった従来型の諸対策だけでは十分にカバーしきれない状況にある。そこで、CO₂回収と地球規模での巨大な自然エネルギー(主に太陽エネルギー)とを結合したCO₂グローバルリサイクルシステムによってその困難を打開する可能性を取上げた。その原型モデルを次に示す。



このCO₂グローバルリサイクルシステムには、エネルギー産地と物質資源他(=CO₂発生地)とが地球上の遠隔地に存在することに起因する、多くの課題が含まれている。すなわち、大量CO₂遠距離輸送や、長距離エネルギー輸送による損失や、砂漠大規模エネルギープラントの立地や、システムの炭素リサイクル欠損率など、数多くの問題点や不明点があり、その解明と問題点解決への指針が必要である。

2. 調査研究の経緯

この構想はエネルギー・資源学会が選定した1990年10周年記念論文「エネルギーと地球環境の同時解決を目指して」¹⁾において初めて提案された。おりしも、1990年7月地球環境問題の克服をめざした中核的研究

機関として、地球環境産業技術研究機構(RITE)が設立され、RITEの、技術開発シーズを創造する調査研究の委託先の1つとしてエネルギー・資源学会が選ばれた。

当学会は大阪大学教授 鈴木 胖委員長に、東京大学教授 茅 陽一氏を初め12名の委員からなる「自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステム可能性調査委員会」を持ち、その下に大阪工業技術試験所 佐野 寛(現在：大阪ガス)を主査とするワーキンググループ(WG)を組織した。WGでは(CO₂回収・処理技術の調査と評価の)CO₂班、(自然エネルギーの量・分布・入手性の調査と評価の)エネルギー班、(自然エネルギーとCO₂抑制の統合システムの可能性の)システム班と作業グループに分担して効率を高める工夫を凝らし、各研究員が自由にそして集中的に調査研究を進めた。WG委員は次の通りである。

大阪大学 中戸義禮教授、大阪大学 朴 炳植助教授、関西電力(株) 太田修二、大阪ガス(株) 森 牧彦、大阪工業技術試験所 本庄孝子(事務局)と、特定テーマWG(H4年度)川崎重工業(株) 大山正俊、(財)電力中央研究所 内山洋司。

事務局からはWGのニュースを適宜発行(2年度：12回、3年度：21回、4年度：35回)して最新の情報(紹介文献 2年度：108件、3年度：91件、4年度：



写1 見学会

214件、及び諸学会の関連事業)をそれぞれコメント付きで提供した。また見学会(写真1)、講演会等を企画して地球環境研究諸団体との連携をはかった。

WG委員が当調査研究に関連して発表した研究成果の件数は以下の通りである。

	2年度	3年度	4年度	H5.4以降
口頭発表	8	23	26	4
論文発表	7	10	5	
特許		1	1	

3. 各年次の経過

初年度ではシステムの理論的な成立可能性を検証した。海外には化石燃料年生産量の数百倍の砂漠太陽エネルギーがあることと、CO₂リサイクルを組み合わせることにより、地球規模の海外自然エネルギー輸送が容易になることも明らかにした。これは同時に、炭素リサイクルの究極像を明示したものと見える。あわせてその国際的波及効果や、システムに予測されるネックについても調査しシステムの原型モデルを構築した。

第2年度はさらに原型モデルの展開をはかるべく広範な問題点の掘り起こしを行い、リサイクル支援に有効なアイデアの取り込みを進めた。

第3年度はモデルの有用性を確認し、世界に提案すべきシステムの具体化のための課題抽出を行い、

- (1)CO₂回収技術の調査と提案
- (2)自然エネルギーの量・分布・獲得技術の調査と評価
- (3)エネルギー輸送とCO₂輸送の調査と評価
- (4)自然エネルギーの獲得とCO₂抑制の統合システムの提案とした。さらに、現行の化石燃料システムからの離脱への過渡期へ向けてその実施適期を探った。

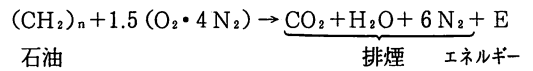
当システムの推進には、様々な過渡期の課題が残されている。だが、本システムは、21世紀へ向けて描き出された壮大な未来ビジョンであり、さらに展開を進めてゆく必要があろう。次にシステムの主要な要素技術について紹介する。

4. リサイクルの入り口：CO₂回収システム

従来型のCO₂回収(化学吸収法、吸着法、分離膜法)は空気窒素で希釈された排煙(CO₂濃度10~20%)を対象としているため回収に要するエネルギーは大きく、

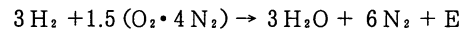
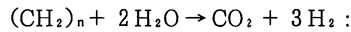
工業的な速度ではほぼ0.4kWh/m³・CO₂となり、原料エネルギーの約10%、発電量の約1/4を消費する。

CO₂濃縮・回収の所要熱を節減する改良もあるが所要動力が増大するので、エネルギー節減はかなり難しい。



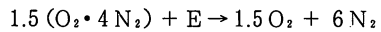
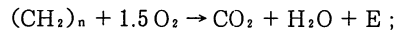
さらに、これらの回収法では、回収率を高めるのとエネルギー消費が急増する点も、CO₂リサイクルシステムを完成する際の障害となろう。

燃料水蒸気改質によるCO₂回収は分離対象ガスの容積縮減が期待され、回収の所要エネルギーも相応に節減できる可能性がある。



CO₂とH₂の分離は、CO₂とN₂との分離より物性差が大きいから有利であり、例えば、燃料電池の改質前処理にも便乗できる。ただし、改質での高温顕熱消費を外部から補給せざるを得ず、さらに、高温のガス分離の困難性、炭素副生防止のため多量の過剰水蒸気吹込みが不可欠なこと、などのため一般化・大規模実施には多くの障害がある。

純O₂燃焼は理論的には排煙の窒素希釈がなく、水分離のみで、CO₂回収可能になる。



これには、空気からの純O₂分離のエネルギーが必要である(=0.4~0.3kWh/m³・O₂)ので、排煙回収に比べて優位を得ることは困難と見られていた。しかし次のような純O₂燃焼特性メリットを活かせば純O₂使用負担をカバーして有望なシステムになる。

- ①熱の集中的発生を利しての効率上昇メリット。
 - ②燃料の炭化分解を前処理に導入、純O₂使用量を節減。
 - ③有害不純成分(SO_x, NO_x, ばいじん)除去が容易になるので、粗悪燃料使用では大幅に優位。
- 種々の発電システムの特長について検討したところ^{A3)}、

- (1)アミン系吸収法ではCO₂回収率を高めると、複合発電システムでも従来型の蒸気タービン発電効率(38%)より悪い。
- (2)燃料改質(石炭ガス)法では水素タービンとCOの

純O₂燃焼作用によりCO₂90%以上の回収，効率37%。

(3)溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)はCO₂濃縮発電システムとして発電効率42%。

(4)O₂燃焼方式としては，

(4-1)メタノール焚複合発電(発電効率41~51%，CO₂回収98%)²⁾。

(4-2)地域冷暖房コージェネレーションシステム(総合効率54%，CO₂回収95.6%)。

(4-3)工場廃熱利用の無公害高効率発電システム(エクセルギー効率48%，CO₂回収99.8%)。

(4-4)多重熱利用サイクルを用いた高効率発電システム³⁾(送電端効率42%，CO₂回収98%)等のシミュレーション結果を得た。CO₂の回収は技術的には十分可能であると期待できる。

5. リサイクルの原動力：エネルギー獲得・変換システム

〔エネルギー獲得〕図-1に示すように自然エネルギー資源量のうち直接太陽エネルギー，地球受光太陽エネルギー173k・TW(=兆ワット)は，現在の化石エネルギー需要10TWの17,000倍ある。大気・雲の吸収・反射による減損及び昼間率・緯度補正・太陽電池獲得効率等を割り引いても，現技術による潜在可採量は8,000TW(需要の800倍)と膨大である⁴⁾。

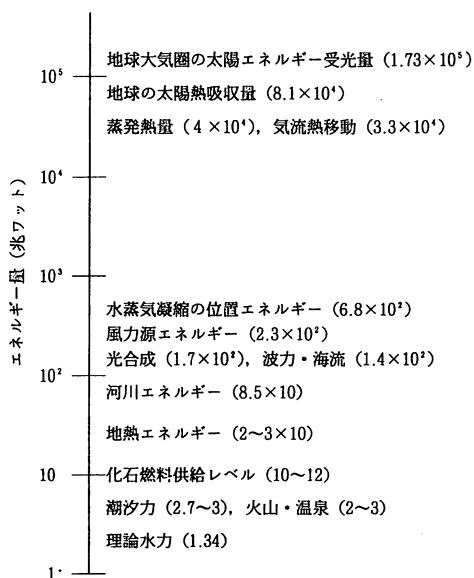


図-1 地球上の各種自然エネルギー量

間接太陽エネルギー(水力・風力・バイオマス)量は大幅に少なく，最近見いだされた南極高原周囲のカタバ風力⁵⁾など(需要の約6倍)を除けば，現在の需要にさえ及ばない。化石燃料代替量確保用の資源としては，当面直接太陽利用(砂漠の太陽光発電，太陽熱発電)に絞られる。

太陽エネルギー獲得の定量的な検討を行った結果，地表の5~10%を占める亜熱帯砂漠域($30 \pm 10 \text{Mkm}^2$)が，天候・緯度の点で日射量が断然有利であり，最良の地帯である。また，高冷高原(太陽電池)においても砂漠太陽の約1/4量が賦存する有力資源であることを認めた。

太陽エネルギー基地の構想；集電→送電(→貯電)→電解→合成→積出，の技術的可能性の現状をまとめた。立地条件は「エネルギー加工地まで有利な送電距離範囲(約300km)内にある，海に近い砂漠」が選ばれる。さらに海水揚水発電の適地であれば最もよい。具体的に3候補地を抽出してその長所・短所を洗い出した。

〔エネルギー変換〕太陽エネルギー基地は日本から長距離にあり，海上輸送法が重要な問題になる。太陽発電の電力を用いて水電解(SPE水電解：変換効率90%)により水素を得て，さらにより良い輸送形へ変換する。

CO₂の水素化によって獲られるエネルギー有機物(合成燃料)候補は，以下(①~④)のような評価基準で比較検討した(詳しくはA1)参照)。

① cal/モル-CO₂，またはCO₂分子当りの担持水素数

	ギ酸	CO	炭素	メタノール	油(CH ₂)	メタン
H ₂ モル/モル-CO ₂	1	1	2	3	3	4

H₂モル/モル-CO₂が2以下は不利。

② cal/容量：COガスやメタンガスは論外で，メタノール，油，LNG(メタン)が選定できる。

③ cal/重量：メタノール，油，メタンLNGの順に改善。

④ 反応・精製の容易さ，および収率，熱損失：メタノール，油，メタンの順か？まだ技術的に成熟していない。(合成工程のエネルギー残存率は，メタノール：大幅な高活性触媒を前提として総合効率80%。

メタン：2段階モデルで総合効率71%となる。）

CO₂からの燃料合成については、光還元→光電気還元→電解還元→水素還元順にエネルギー源から遠くなり、同時に反応条件が楽になるというジレンマがある。

6. 地球規模輸送：10,000kmの海越えシステム

6.1 エネルギー輸送

主要な砂漠太陽エネルギー産地は日本から平均1万kmのかなたにある。太陽エネルギーの輸送型としては、次の順に加工度を高めるにつれ、輸送し易くなる傾向がある。

- ①光（光ファイバ★減衰）。
- ②熱（温水パイプ★減衰）。
- ③電力（電線★減衰、高価）。
- ④電解水素ガス（パイプライン☆深海底、200km程度のポンプステーション、高価）。
- ⑤液体水素（LHタンカー☆超低温、容積大（=少cal/容量）、危険）。
- ⑥合成炭素燃料（タンカー◎化石燃料のみ）。

上記の中からタンカー容量比を主に検討評価して⑥に絞り、メタノール、合成油、メタンLNGについて評価した。

〔cal/容量〕順：油>LNG>メタノール。

低温負担控除：油≧メタノール≫LNG。

さらに次節のCO₂タンカーとの組合せ、往復兼用船とすると

メタノール>油>LNG。

6.2 CO₂輸送と貯蔵

〔CO₂輸送〕CO₂は常圧では沸点-78℃以下で固体(S-CO₂：ドライアイス)として存在する。三重点(-56.6℃, 5.28気圧)の存在のため液体L-CO₂は常圧では存在せず低温加圧域にのみ存在できるという、特異性がある。このため、LPG型やLNG型タンカーなど液化ガスタイプに比べて厳しい条件となり、独自の概念設計を必要とする。CO₂輸送候補は次の通り：

- 1) 常温・高圧型タンカー（L-CO₂）
…ポンベ型（★過重）
- 2) 中低温・中高圧型タンカー（L-CO₂）-20℃, 20気圧…市販液炭型（☆タンク壁厚い）
- 3) 低温・中圧型タンカー（L-CO₂）-40~-50℃, 10~7気圧…（☆固体折出点近い）

- 4) 低温・常圧型キャリアー（S-CO₂）-78℃, 1気圧
…ドライアイス型（☆荷役）
- 5) 中低温・中圧型タンカー（CO₂水和物）0℃, 12.5気圧…シャーベット型
- 6) 常温・中圧型タンカー（溶液or炭酸イオン）
…溶媒or中和吸収液型

1) はポンベ型耐高圧構造が大型タンカーにとって論外である。2) はタンクローリーなど小型用の延長である（350tあまぎ丸）。3) は大型用として考案されているが、固体析出の3重点接近があり、温度制御の信頼性が勝負になるであろう。4) 固体荷役がネックである。5) CO₂水和物（6CO₂・46H₂O）はCO₂重量の3倍以上で不利、6) はCO₂重量の70倍以上で論外である。この中で3), 4) が物性上優位となる。

CO₂の輸送^{8,9)}は貯蔵、船舶輸送、荷役のトータルシステムとして検討した。現在陸上のL-CO₂タンクは2,000t(-20℃, 20気圧)の大きさのものがあり、万t級の大型圧力タンクの実績はない。長距離輸送用CO₂タンカーのタンクを設計基準IGCコードに従って試算した結果、直径43mのタンク（CO₂温度約-50℃）が可能である。

CO₂タンカーの特色は

- ①CO₂は燃焼性がないのでガス漏れの場合でも危険が少ないが窒息性ガスである。
- ②L-CO₂は常に下限（三重点）と上限（臨界点）の中間域でしか使えない。
- ③三重点になると固相転移を起こすので、荷役に障害を与える。

S-CO₂（-78.5℃）輸送は、常圧で運べるメリットがあるが、この温度のバルクキャリアーの前例がない。

S-CO₂はブロック（コンテナサイズ約30t）、ペレット及び粉末の3形態を選び、既存の貨物船（油タンカー、バラ積み船、コンテナ船）を参考にして、ボイルオフを最小化する方法と荷役の容易さ等を求めた。また、そのため新たにCO₂固液変換型タンカー⁷⁾、ドライアイスタービンを検討した。

〔CO₂貯蔵〕リサイクルシステムの立上げまでのタイムラグ、あるいはシステム運営中の合成エネルギーの供給のために、CO₂大量貯蔵技術の確立が望ましい。候補とその問題点を掲げる。

- 1) 廃油田EOR…★需要地側には少ない。CO₂600億t貯蔵可（全世界排出3年分）

- 2) 帯水層等地中…★再回収困難, ★地層中の石灰溶失.
- 3) 深海隔離貯蔵…★再回収率の不安, ★環境拡散可能性.
- 4) 極地高原貯蔵…☆送り込みのためCO₂輸送¹⁰.

CO₂100世紀以上分貯蔵可.

CO₂リサイクル性からは1), 4)が有望である.

4)はドライアイス型貯蔵を南極高原(年平均気温:-50℃)にて行う技術で, 風穴の原理(低地最低気温集積)の応用による新提案である. 無保守, 収容量無制限を目指すことができる点で地球規模・世紀間の貯蔵に適している.

7. システムとその展開

7.1 エネルギー基地の設計構想

砂漠の太陽電池基地は, 地表被覆率(緑化支援兼用の場合, 重要), 集電(施設費・損失考慮により電解工場までの距離決定)等の配慮から, 出力密度10~20 MW/km², 海岸より300kmくらいまでが可能というイメージになる. 日射量の多い砂漠で, 海に接しているモデル地域「砂漠の窓」は, 全世界の中で:北西オーストラリア, カリフォルニア半島, アラビア半島南部が有力である. それぞれ, 日本のエネルギー需要をまかなうに足りる潜在エネルギー資源を保有している.

砂漠外の基地可能性としては, チベット高原(太陽)が資源的に有望であるが, 海運に恵まれず, 日本ではなくインドへのエネルギー供給圏として好ましい. 地球上最大の風力地域である南極風力基地については, CO₂貯蔵基地としての能力をも活かしてポスト化石時代の利用を目標とすると適当であろう.

7.2 エネルギー輸送用燃料の選定:メタン/メタノールシステムの成立条件

メタノールに比べてメタンを含むシステムは, 単独では競争力が弱い. すなわち, メタンはその長所:

①CO₂分子当りの担持エネルギーが最大である.

②cal/容量(LNG)は2割以上大きい.

③利用において最も省炭燃料である.

等にもかかわらず, 沸点-161℃のLNGは製造・輸送・貯蔵の負担が大きく, 長所が打ち消される.

メタン(LNG)システムが優位に立つのは, 既存のLNGシステムが稼働している地域で, 同時に太陽エネルギー資源が豊富に得られる場合(北西オーストラリア, アラビア)である. その理由は

①既存設備利用:液化基地, 積み出し・タンカーなどのインフラが用意されている.

②天然ガス随伴CO₂のリサイクルシステム取込み:天然ガス田は, CO₂を数十%含むLNG化の前に分離廃棄され, 地球環境に負荷を与える. 太陽水素によりCO₂をメタン化できる.

7.3 燃料・CO₂の兼用船輸送システム

燃料・CO₂を往復の積み荷とする兼用船を検討すると, 両貨物の物性の適合性(容量, 温度, 圧力及び形状等)が重要な因子となって輸送船の設計の優劣が変動する. すなわち, メタノールとLNGはほぼ等モルの液体炭酸と等容積なので, 妥当な燃料となる. それより減容できる油(CH₂)_n合成は積極的な輸送性改善に寄与しない. 兼用船の設計上見掛け比重に近いほど効率のいい船ができ, メタノールはL-CO₂, S-CO₂の見かけ比重に近いがメタンは半分以下である. L-CO₂/メタノールでは温度差Δt=70℃, L-CO₂/LNGで

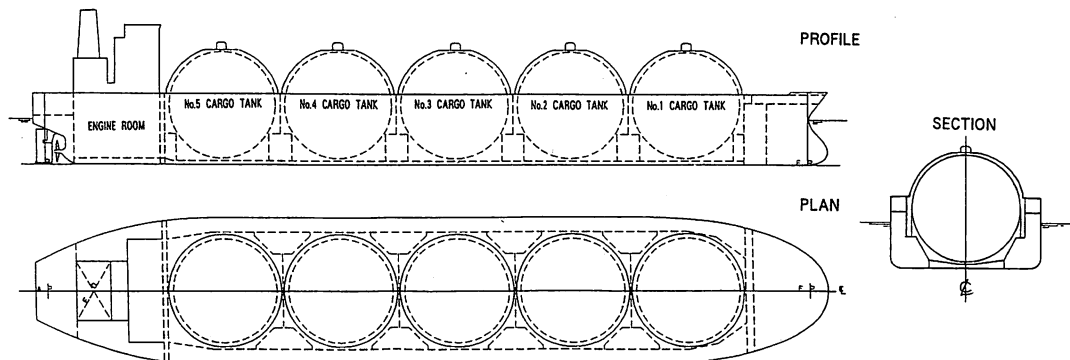


図-2 L-CO₂/メタノール兼用船イメージ

は $\Delta t = 120^{\circ}\text{C}$ となりLNGの方が厳しい。圧力・温度の変化による材料/構造の引張り/圧縮応力、熱応力等は往復航の毎に繰り返され、材料選択・構造様式の注意が求められる。

これらの因子を総合して、L-CO₂の場合、球形圧力タンカーをベースとしたメタン/L-CO₂、メタノール/L-CO₂タンカー（図-2：直径43mのタンク5つを備えた23万t級タンカー）の設計ガイドライン（主要目）を示し、10,000km輸送時の防熱、ボイルオフ対策及び荷役スケジュール等を検討した。S-CO₂の場合「鉱油兼用船型」、「バラ積み油兼用船型」、「コンテナ船（他に比べて高値）」をベースとしたメタノール/S-CO₂船等が候補となる。

兼用船はお互いの積荷に対して過剰装備になるが、別々に作るよりも有利になる。S-CO₂は船積み大量輸送の例もなく、特に荷役システムについては今後開発すべき課題が多く、当面はL-CO₂の方が信頼性が高い。

7.4 エネルギー収支と経済評価

火力発電排煙CO₂を回収して、海外の自然エネルギー基地まで輸送し、CO₂をメタノール化するシステムについてエネルギー収支と経済性の分析を行った。現在の価格体系および技術水準をベース¹¹⁾として試算すると、得られるメタノールの価格は、現在の化石燃料と同水準価格にあるカナダ水力を原料とすれば約7倍、現在の化石燃料の10倍の水準にある太陽電池電力では約20倍の価格となり、今日の石油燃料との市場競争に耐えられない。当然、このシステムはポスト石油対応である。

なお将来、主要な化石燃料枯渇後（石油・天然ガスがピークを越える21世紀中葉）または化石炭素使用制限が付される状況が出現する場合はその限りではない。

8. あとがき

本調査研究の主眼は新規アイデアの展開であり、地球環境問題について日本から世界へ向けての発信として特筆される。またエネルギー・資源学会の事業連鎖

の形態としても、記念論文→受託研究→国家事業……という展開を目指している点で、一つのモデルとなるものと思われる。

おわりにこの3年間、会員各位のご助力と励ましのおかげで、「地球には心を、人には愛を、そしてプロジェクトには夢を」の姿勢をつらぬきましたことを感謝するしだいです。

〔トピックとなった発表〕

- 1) 佐野 寛, 石井英一: 「エネルギーと地球環境の同時解決を目指して」, エネルギー・資源, 11 (2), 101~106 (1990).
- 2) 朴 炳植, 田崎嘉邦, 鈴木 胖: 「CO₂回収メタノール焚火力発電システムの特性」, エネルギー・資源, 14 (1), 72~77 (1993).
- 3) 朴 炳植, 鈴木 胖: 「多重熱利用サイクルを用いたCO₂回収無公害高効率火力発電システム」, エネルギー・資源学会, 第12回研究発表会, 221~224 (1993).
- 4) 佐野 寛, 太田修二, 本庄孝子: 「化石燃料全代替のための太陽エネルギー基地所要面積の評定」, エネルギー・資源, 13 (6), 498~502 (1992).
- 5) 佐野 寛, 本庄孝子, 太田修二: 「南極風力エネルギー基地システム」, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス59~64 (1993).
- 6) 佐野 寛: 「地球温暖化ハンドブック」, アイピーシー, 小宮山宏監修 (1990).
- 7) 本庄孝子, 佐野 寛: 「固~液変換型CO₂タンカーの提案」, エネルギー・資源, 13 (2), 76~80 (1992).
- 8) 本庄孝子, 佐野 寛, 大山正俊: 「CO₂輸送船概念設計への前提条件」, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス, 特5-6, 421-426 (1993).
- 9) 大山正俊, 本庄孝子, 佐野 寛: 「液化炭酸ガスキャリアの試設計」, エネルギー・資源学会第12回研究発表会, 225~230 (1993).
- 10) 佐野 寛, 本庄孝子: 「南極大陸CO₂貯蔵の技術可能性」, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス, 389~394 (1993).
- 11) 内山洋司: 「CO₂削減からみた発電プラントの将来展望」, エネルギー・資源, 14(2), 6~12 (1993).

〔本研究の成果報告〕

- A1): 「自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステム可能性調査」NEDO-RITE-エネルギー・資源学会, NEDO-ITE-9002-5, (1991).
- A2): 「同上」, NEDO-RITE-エネルギー・資源学会, NEDO-ITE-9110-2, (1992).
- A3): 「同上」, NEDO-RITE-エネルギー・資源学会, NEDO-GET-9210-2, (1993).

(文責: 大阪工業技術試験所 本庄孝子)

次号予定目次「エネルギー・資源」11月号(82号) (刊行：平成5年11/5)

〔論 説〕

地球環境技術展・シンポジウム（ニューアース'93地球環境再生への挑戦）開催に寄せて

……………(財)地球環境産業技術研究機構 専務理事 山口 務

〔展望・解説〕

南極風力基地システム ……………大阪ガス(株)開発研究所技術顧問 佐野 寛

〔特 集〕

デマンドサイド・マネジメント

(1) デマンドサイド・マネジメントの展望と問題点 ……………東京大学工学部客員助教授 浅野 浩志

(2) 米国におけるデマンドサイド・マネジメントの動向

……………(株)三菱総合研究所 システム政策部社会技術政策室室長代理 諸住 哲

(3) 日本型デマンドサイド・マネジメントの可能性 ……………名古屋学院大学経済学部助教授 木船 久雄

(4) 負荷遮断料金によるデマンドサイド・マネジメント

……………(財)電力中央研究所 経済社会研究所エネルギーシステムグループ主査研究員 松川 勇

(5) 電力系統から見たデマンドサイド・マネジメント

……………横浜国立大学工学部電子情報工学科助教授 大山 力

(6) 負荷集中制御システム実証試験 ……………九州電力(株)配電部総合自動化担当課長 柿本 仁司

(7) 都市ガス冷房による電力のピークカット

……………東京ガス(株)技術企画部技術計画グループ副部長 渡辺 尚生

(8) デマンドサイド・マネジメントのためのハードウェア技術

……………三菱電機(株)電力変電技術部長 鈴木 浩

〔シリーズ特集〕

明日を支える資源(48)

ミャンマーの資源の現状と将来 ……………日本国際協力センター 開発部調査研究員 佐々木英憲

〔研究論文〕

鉄屑のリサイクルを考慮に入れた鉄鋼業の省エネルギー可能性評価

……………東京大学工学部資源開発工学科助手 松橋 隆治
他

〔見聞記〕

第1回熱エネルギー国際会議に参加して ……………広島大学工学部教授 菊地 義弘

〔書 評〕

「トリレンマへの挑戦」 ……………大阪市立工業研究所 工業化学課研究主任 小山 清

「エネルギー・経済統計要覧」 ……………専修大学経営学部教授 斎藤 雄志

〔グループ紹介〕

(財)日本システム開発研究所 ……………常務理事 垣田 行雄

(株)ダイヘン ……………研究開発部部长 花岡 克己

〔技術・行政情報〕 ……………大阪工業技術試験所 無機機能材料部長 石川 博

〔談話室〕

「総論と各論」 ……………清水建設(株)エンジニアリング本部副本部長 篠田 雅夫

〔編集委員会便り〕 ……………専修大学経営学部教授 斎藤 雄志

〔会 報〕

投稿について

編集実行委員会では、会員からの下記のような種類の原稿の投稿を歓迎いたします。学問的、技術的知見、経験などで公開できるものは、出来るだけ多く「エネルギー・資源」誌上にご発表いただき、会員の相互啓発、ひいては我が国の産業界、学界等の発展に寄与していただきたいと思います。

(原稿の種類)

種類	内容	1件につき 基準頁数
論説	提案, 意見, 批判, 時評	4 P
展望・解説	現状と将来の見通し, 研究・技術の総合解説, レビュー	6 P
技術報告	実際の試験・調査の報告	5 P
技術・行政情報	価値ある技術・行政情報を簡潔に 解説し, コメントを付す	1 P
見聞記	国際会議の報告, 内外の研究機関 の見学記など	2 P ~ 4 P
書評		1 P
談話室	会員相互の情報交換, 会員の自由 な声, 随想など	1 P
グループ紹介	企業, 研究機関, 大学等のグル ープ紹介	1 P
研究論文	オリジナルな研究論文で本学会の 会誌に掲載するのが適当とみられ るもの	6 P

- (注意事項)
1. 原稿の採否分類等については、編集実行委員会で決定いたします。
(但し、研究論文については研究論文査読委員会にて事前に審査を行う。)
 2. 抜刷は原則として30部に限り進呈いたします。(刷上り4頁以上のもの)
 3. 研究論文については投稿料(別刷代)を頂きます。別刷は50部とします。
 4. 投稿にあたっては、本会「執筆要項」をご参照の上、所定の原稿用紙(送付)をご使用下さい。
 5. 著作権は本会に帰属します。

編集実行委員長 越後 亮三
(東京工業大学工学部機械工学科教授)

エネルギー・資源

ENERGY AND RESOURCES VOL. 14 NO. 5

平成5年9月5日発行

(奇数月5日発行)

定価 1200 円 (送料別)

振込先 大和銀行御堂筋支店 エネルギー・資源学会
普通口座 No.1024046 郵便振替口座 (大阪3-302948)

発行所 エネルギー・資源学会

発行人 上野 祐蔵

事務局 〒550 大阪市西区京町堀1-9-10
(帽子会館3階)

TEL (06) 446-0537

FAX (06) 446-0559

印刷所 大阪タイガー印刷(株)

〒530 大阪市北区天満4-8-5

TEL (06) 351-1041(代)

本誌の内容の一部あるいは全部を無断で複写、複製すると、著作権および出版権の侵害となることがあります。

品質向上と省力化、省エネに 대응。

冷却ロールの決定版 ヒートパイプ式冷却ロール

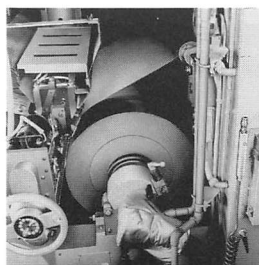
拡大・多様化するニーズに対応。

近年、ラミネートの技術の発展およびベース材料の多様化にともなう、ラミネート製品の応用分野は著しく拡大しています。素材の開発に努める製紙・フィルム業界、豊かな表現を求める印刷業界、複雑で高度な加工技術を駆使するラミネート業界では、より高度の品質と生産性の向上が求められています。こうしたニーズに対応してササクラが開発したのが“ヒートパイプ式冷却ロール”です。製品のできあがり直接影响到与える重要な工程に使用される冷却ロールにササクラ独自の熱交換器の先端技術を採用。品質のグレードアップと製造プロセスの高速化や省力化を可能にしました。今までにない画期的な原理を駆使して従来型冷却ロールが抱えている表面温度の不均一、夏季のスピードダウン、結露の発生などの諸問題を一挙に解決。飛躍的な冷却特性で安定した高品質性と大幅な生産性向上および省力化を同時に実現します。

第27回(平成4年度)
機械振興協会賞受賞

■用途

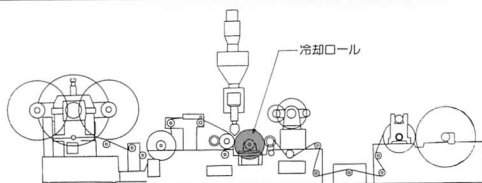
- ラミネーター機
- キャスト機
- オフセット印刷機
- その他



エクストルージョンラミネーター導入例

■使用例

エクストルージョンラミネーター



特性

1. 表面温度が均一。
2. 結露によるトラブルを解消。
3. 冷却水量を節減。

株式会社ササクラ

本社 / 〒555 大阪市西淀川区竹島4丁目7番32号 TEL.06(473)2133 FAX.06(472)4333
東京事務所 / 〒103 東京都中央区八重洲1丁目3番8号(井田ビル) TEL.03(3271)7771 FAX.03(3281)1928
■お問い合わせ:プラント部

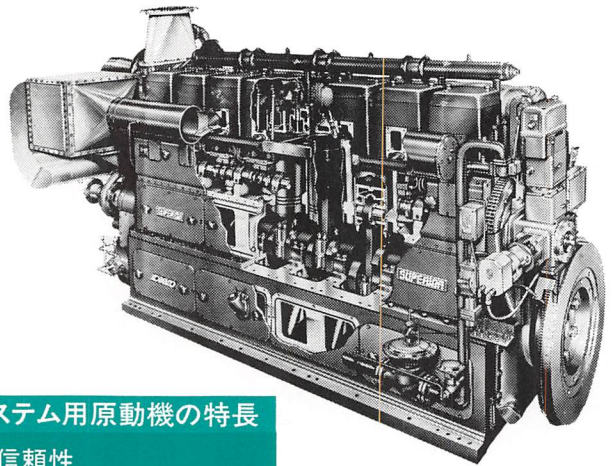
KOBELCO

排熱もエネルギーになる。

熱効率75~80%を実現した、神戸製鋼の
コージェネレーションシステム。

神戸製鋼のコージェネレーションシステムは、ガスタービン・ガスエンジン発電機を用いて電力を発生させると同時に、その排熱を蒸気や温水として回収利用し、冷暖房、給湯、加熱、乾燥など幅広く利用できる省エネルギーシステムです。また、このような排熱の有効利用によって、熱効率も従来のシステムに比べ2倍以上に向上します。

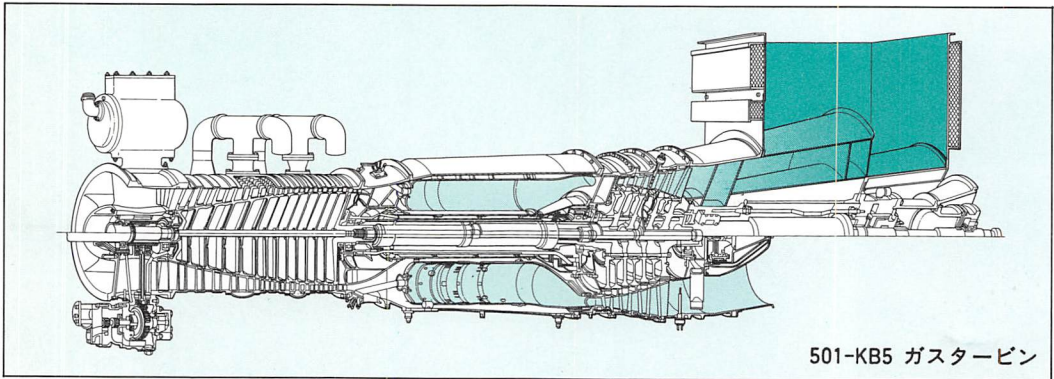
神戸製鋼は、豊富な実績と経験をもって設計・施工はもとより、ランニングコストの低減、無公害といった問題をも解決し、時代の要請にトータルエンジニアリングでお応えいたします。



SUPERIOR 8SGTB

KOBELCOのコージェネレーションシステム用原動機の特長

- 幅広い出力レンジ
- 高い信頼性
- 高い発電効率
- 環境規制に対応した低NOX



501-KB5 ガスタービン



東京本社 回転機営業部 〒100 東京都千代田区丸の内1-8-2 (鉄鋼ビル) TEL.(03)3218-7070(ダイヤルイン) FAX.(03)3284-1318
大阪支社 回転機営業部 〒541 大阪市中央区備後町4-1-3(御堂筋三井ビル) TEL.(06)206-6517(ダイヤルイン) FAX.(06)206-6595

エネルギー・資源学会第7回技術賞 候補者推薦のお願い

本会は昭和62年4月「エネルギー・資源学会技術賞」を制定し、本会会員（正会員または特別会員会社に所属する者）で、エネルギー・資源に関する科学技術の発展のために、基礎または応用に関して、特に顕著な業績をあげられた方々に本賞を授与することになりました。

このたびエネルギー・資源学会第7回技術賞候補の推薦（自薦あるいは他薦）を下記により受け付け致しますので、会員各位に広く候補者の推薦をお願いいたします。

推薦の締め切り：平成5年10月末日

申し込み先：〒550 大阪市西区京町堀1-9-10（帽子会館）
エネルギー・資源学会 会長 三井恒夫宛
（申請書、推薦書などは事務局にご請求下さい。）

エネルギー・資源学会技術賞規定

（昭和61年7月11日常任理事会にて作成）

- 〔総 則〕 エネルギー・資源学会技術賞については、この規定に定めるところによる。
- 〔対 象〕 本賞は本会会員（正会員または特別会員会社に所属する者）で、エネルギー・資源に関する科学技術の発展のために、基礎または応用に関して特に顕著な業績をあげた者に授与する。
- 〔 賞 〕 本賞は、毎年2件以内とし、賞状および副賞として記念品を受賞者に贈呈する。
- 〔応 募〕 応募の際は、本会指定の申請書、推薦書などに所定事項を記入し、必要な参考資料を添えて、毎年10月末日までに会長に申し出るものとする。
- 〔受賞候補の選考〕
1. 本賞の受賞候補者の選考のために、技術賞選考委員会をおく。
 2. 選考委員会は、毎年会長が委嘱する。委員長は会長または会長の指名する者とする。
 3. 選考委員会内規は別に定める。
- 〔受賞者の決定〕 受賞者の決定は、常任理事会の決議を経て行うものとする。
- 〔受賞者の表彰〕 受賞者の表彰は、毎年定時総会後の表彰式で行う。

エネルギー・資源学会会員名簿作成に関するお知らせ

本会では、平成5年度（第14期）事業の一環として本年11月刊行を目指して、会員名簿を作成いたします。会員名簿は、3年に一度の刊行であり、今回は、平成2年度以来の刊行となります。平成2年は、本会が研究会から学会へと移行した年度でもありましたが、この3年間で、会員数は、正会員が250名増加、特別会員が30社増加、今後とも、わが国のエネルギー・資源・環境分野を代表する団体の一つとして、ますますの発展を期待されています。

さて、会員名簿は、全ての正会員、特別会員に無料配布いたしますので、本号会告の後にさし込みましたハガキに適宜記入頂き、平成5年9月末日までにご投函下さい。尚、特別会員各位におかれましては、別便にて記入様式が異なる調査票を送付いたしております。

いずれの際にも御返信なき場合は原簿に基づき印刷されますので、くれぐれも御注意下さい。

