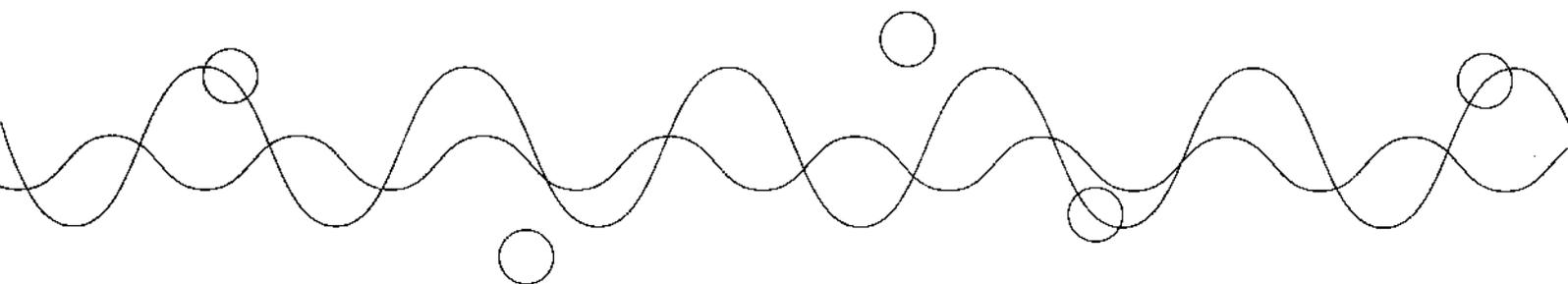


「希薄分散エネルギー活用技術」に関する 科学技術未来戦略ワークショップ報告書



平成 20 年 3 月



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

Executive Summary

本報告書は、独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が2007年10月11日に開催した「希薄分散エネルギー活用技術」に関する科学技術未来戦略ワークショップの結果をまとめたものである。

ここで言う希薄分散エネルギーとは、いたるところに分散しているが活用されていない希薄なエネルギー（例えば：電磁波、室内人工光、体温、PCの廃熱、生体、自然振動等）をさす。

日本のエネルギー変換技術のレベルは世界的にみても高水準にある。しかし各種エネルギー変換技術について個別の取り組みはあるものの、「希薄分散エネルギー活用」という観点からの検討はまだほとんどなされていない。一方、未活用エネルギーを集めて利用する技術に対する関心は高まっており、欧米ではこれに関連する国際シンポジウムも開催されるようになっている。このような国内外の流れから「希薄分散エネルギー活用技術」をワークショップのテーマとして取り上げた。

本ワークショップでは、希薄分散エネルギーの活用という視点から、新しい概念、新しい発想に基づいたエネルギー変換方式の創出の可能性や、萌芽的技術のポテンシャルを探る事に重心を置いた提案や議論を引き出すことを目的の一つとした。また想定される用途に対して、現状の萌芽的技術から実用化に手が届きそうなエネルギー変換／収集技術の中で、技術的ブレークスルーを誘発する可能性の高い技術課題の明確化についても議論した。

本ワークショップでは、以下の点を明らかにすることを目的として、構成を企画した。

- [a] これまで個別に取り組みされている各種エネルギー変換技術の研究に対し、「希薄分散エネルギー活用技術」という研究分野を新たに設定して、それにファンディングする意義があるか。
- [b] 希薄分散エネルギー活用のための課題は何か。その課題解決のために具体的に何をすればよいか。またそれによって何が可能となるか。

上記 [a] に対しては、事前に CRDS で「希薄分散エネルギー活用」に関する仮説を立て、この仮説をワークショップの議論で検証するという方法を取った。また [b] については、仮説アンケートに加えて、現在進められているエネルギー変換技術を中心に、各技術の現状と課題および研究推進方法に関する事前アンケートを実施した。

CRDS 仮説に対する議論より、以下の理由から、「希薄分散エネルギー活用技術」というカテゴリーを設定する意義、およびそれにファンディングする意

義があるとの結論が得られた。

- (1) エネルギー変換に関する各種の研究が個別に進められている一方で、センサ等の応用デバイスにおける低消費電力化が大きく進展しており、本ワークショップで取り上げた「希薄分散エネルギー活用技術」というテーマを推進すべき時にきている。世界的にも“Energy Harvesting”というキーワードでの研究が急増しており、「希薄分散エネルギー活用技術」は今後重要な研究テーマとなると予想される。
- (2) 「希薄分散エネルギー活用技術」に関連した各種エネルギー変換技術に関する個別の研究グループは現状では小さなグループであり、このままでは大きな研究規模に発展し難い。「希薄分散エネルギー活用技術」という研究分野をまとめることで、技術や方法論の共有により正のフィードバックがかかり、研究が進展する。
- (3) 希薄分散エネルギー活用技術は、その応用先の開拓と、基盤技術の集積の双方に取り組むことで発展する。今まで誰も気づかなかったような応用例が生まれる可能性もあり、そのアイデアを引き出すために、異なる原理に取り組む複数のグループの情報交換は極めて効果的である。

希薄分散エネルギーの課題は、利用しにくい希薄分散エネルギーを如何に利用しやすい形態（例えば電気エネルギー等）に変換するか、である。本ワークショップではこの技術を多面的に検討し、技術現状と課題を明らかにした。

電気エネルギーは人類が用いている最も使い勝手がよいエネルギーであり、他の様々なエネルギーから変換して用いたいという要求が高い。そして希薄分散であっても常にエネルギーが供給され続け、電気エネルギーとして無限に利用できるとなれば、電気エネルギーが紙やエンピツと同じように「あって当然」というパラダイムシフトが起こるのであろう。そのようなパラダイムシフトが起これば人類が蒸気エネルギーを得て、次に電気エネルギーを得たような全く異なる次元へと人間活動を導くことすらできると期待する。

「ダーウィンの海」を越え、次のステップに移るためにも希薄分散エネルギー研究は一つの分野として相互に協力をはかるべきである。

目 次

1. 本ワークショップの位置づけと開催経緯	1
2. CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果	3
3. 事前アンケート分析結果	5
3.1 希薄分散エネルギー活用技術の現状と課題に関するアンケート結果	5
3.2 研究推進方法に関するアンケート結果	7
4. エネルギー変換技術と課題	9
4.1 熱電素子を用いた微小温度差発電	9
4.2 マイクロ環境振動発電器	14
4.3 電磁波エネルギー変換	20
4.4 色素増感太陽電池	24
4.5 可視光駆動型燃料電池	30
4.6 バイオ燃料電池	32
4.7 生体エネルギー変換素子	38
5. 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術	44
5.1 電子機器側での対応事例	44
5.2 バッテリーレスシステムのセンサネットワークへの応用	50
5.3 自動車の排出エネルギー活用への期待	56
6. まとめと提言	62
執筆者一覧	67
付録1 ワークショッププログラム	71
付録2 ワークショップ参加者一覧	72
付録3 CRDS 仮説アンケートフォーム	73
付録4 現状と課題アンケートフォーム	74
付録5 研究推進方法アンケートフォーム	75
付録6 CRDS 仮説アンケートのまとめ	76
付録7 国内ノート PC、携帯電話の生産台数とアルカリ電池（単3、単4） 販売数の推移	79

1. 本ワークショップの位置づけと開催経緯

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っている。その活動の一環として、重要研究テーマについて専門家による科学技術未来戦略ワークショップを開催している。

この度、「希薄分散エネルギー活用技術」に関する科学技術未来戦略ワークショップ（以下WS）を開催した。コーディネーターを京都大学副学長の松本紘名誉教授にお引き受け頂き、参加者 35 名で議論を行った（WS プログラムおよび参加者一覧は付録 1、2 を参照）。本報告書はその結果をまとめたものである。

ここで言う希薄分散エネルギーとは、いたるところに分散しているが活用されていない希薄なエネルギー（例えば：電磁波、室内人工光、体温、PC の廃熱、生体、自然振動等）をさす。

本 WS のテーマは、2004 年に白浜で開催された科学技術未来戦略ワークショップ（電子情報通信系俯瞰 WS-I）におけるセンサフュージョン合同分科会でのセンサネットワークに関する議論に端を発している。本 WS 開催に至るまでの経緯を図 1.1 に示す。

これから到来するユビキタスネットワーク社会では、莫大な数に上ると予想される様々な情報端末やセンサシステムに最適なエネルギー供給システムが重要となってくる。そこでは電源コードや電池交換など、電源の電気エネルギーをどこからとるかという問題が必ず浮上する。いたるところにある希薄分散エネルギーを電力として活用できるようになれば、ユビキタスネットワーク機器におけるこれら電源の問題が解消されることになり、そのインパクトは大きい。また、電源の概念が変わることで、それらの使用形態、使用法の質的な変化がもたらされる。

しかし現状では、各種エネルギー変換技術について個別の取り組みはあるものの、「希薄分散エネルギー活用」という観点からの検討はまだ殆どなされていない。「利用されていない希薄なエネルギーを収集して活用する」、「いつでもどこでも使える」という視点に基づいたエネルギー活用技術、エネルギー変換技術の研究が課題である。

本WSでは、希薄分散エネルギーの活用という視点から、新しい概念、新しい発想に基づいたエネルギー変換方式の創出の可能性や、萌芽的技術のポテンシャルを探る事に重心を置いた提案や議論を引き出すことを目的の一つとした。また想定される用途に対して、現状の萌芽的技術から実用化に手が届きそうなエネルギー変換／収集技術の中で、技術的ブレークスルーを誘発する可能

1
本ワークショップ
の位置づけと開催
経緯2
CRDS 仮説と
ワークショップで
の検証討論結果3
事前アンケート分
析結果4
エネルギー変換技
術と課題5
需要側からみた希
薄分散エネルギー
活用技術6
まとめと提言

執筆者一覧

付
録

性の高い技術課題の明確化についても議論した。

本WSでは、事前に「希薄分散エネルギー活用」に関するCRDS仮説を立て、この仮説をWSの議論で検証するという方法を取った。これについては次章で述べる。

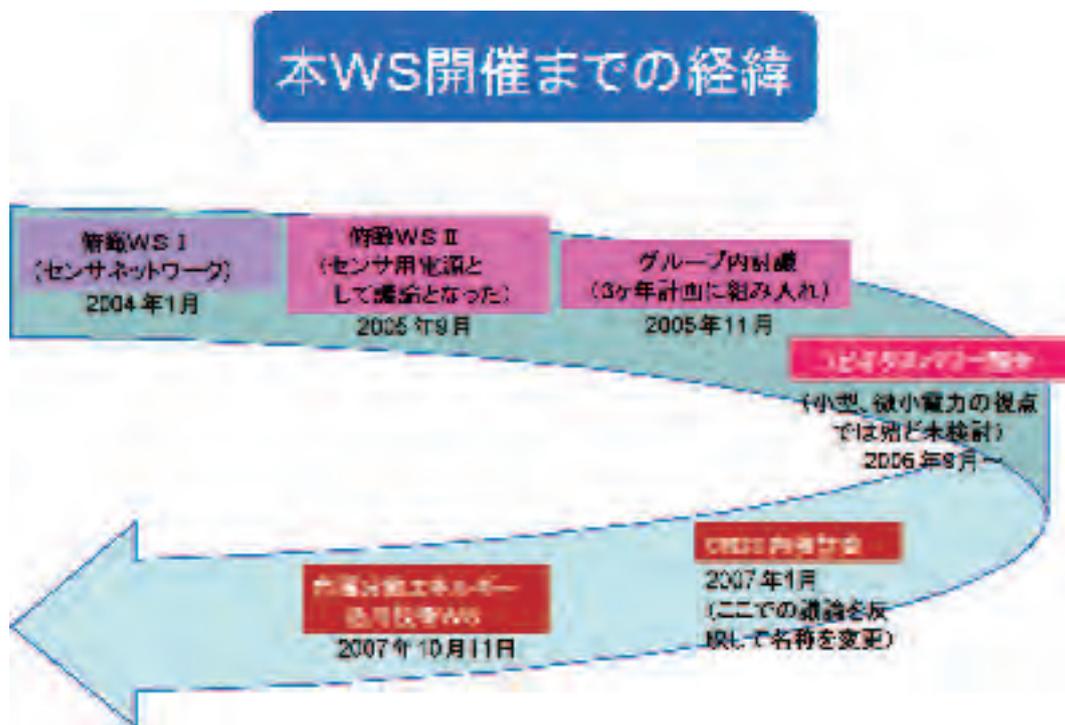


図 1.1 本WSに至る経緯

2. CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

本ワークショップでは、以下の点を明らかにすることを目的として、構成を企画した。

- [a] これまで個別に取り組みられている各種エネルギー変換技術の研究に対し、「希薄分散エネルギー活用技術」という研究分野を新たに設定して、それにファンディングする意義があるか。
- [b] 希薄分散エネルギー活用のための課題は何か。その課題解決のために具体的に何をすればよいか。またそれによって何が可能となるか。

この議論のため、表 2.1 に示す CRDS 仮説を作成し（主として上記 [a] の観点から）、事前に参加者からの回答を纏めた。回答は概ね賛成の意見であった（各仮説に対する意見の抜粋は付録 6 に示す）。当日の議論およびその後の追加アンケート等から、「希薄分散エネルギー活用技術」というカテゴリーを設定する意義、それにファンディングする意義として、以下の理由が挙げられた。

- (1) エネルギー変換に関する各種の研究が個別に進められている一方で、センサ等の応用デバイスにおける低消費電力化が大きく進展しており、本 WS で取り上げた「希薄分散エネルギー活用技術」というテーマを推進すべき時にきている。世界的にも Energy Harvesting というキーワードでの研究が急増しており、「希薄分散エネルギー活用技術」は今後重要な研究テーマとなると予想される。
- (2) 「希薄分散エネルギー活用技術」に関連した各種エネルギー変換技術に関する個別の研究グループは現状では小さなグループであり、このままでは大きな研究規模に発展し難い。「希薄分散エネルギー活用技術」という研究分野をまとめることで、技術や方法論の共有により正のフィードバックがかかり、研究が進展する。
- (3) 希薄分散エネルギー活用技術は、その応用先の開拓と、基盤技術の集積の双方に取り組むことで発展する。今まで誰も気づかなかったような応用例が生まれる可能性もあり、そのアイデアを引き出すために、異なる原理に取り組む複数のグループの情報交換は極めて効果的である。

表 2.1 希薄分散エネルギー活用技術に関する CRDS 仮説

NO.	仮説
1	いたるところに分散しているが現在利用されていない希薄なエネルギー（例えば：電磁波、光、温度差 / 変化、気圧差 / 変化、弱風、物体の運動、生体内エネルギーなど）を利用する技術を開発するために、5年間 50 億円をかければ、数種類の萌芽的な技術が獲得できる。
2	そしてそれらの技術が実用化されれば、IC、センサ及び一部のモバイル機器のバッテリーが不要になる。より大容量の電源が必要なモバイル機器においても、これら技術による常時補助充電により充電作業から解放され、機器の大幅な長寿命化が可能となる。またこれによって1次電池が削減されることにより環境問題緩和にも貢献する。
3	希薄分散エネルギー活用技術は、エネルギー変換技術・変換用新材料、エネルギーの極低損失蓄積技術、システム制御技術の観点から未開の分野であり、それぞれ難関を突破する技術が必要である。この中でもっとも大きなブレークスルーが要求されるのは変換技術である。
4	エネルギー変換技術としては熱電変換効率を 10 倍改善、運動電気変換効率の 5 倍改善、光電変換効率の 5 倍改善ができる。
5	これらの技術は、自然界に存在する希薄分散エネルギーに加えて、人工的な擬似分散エネルギーを作ってそれを活用する技術としても応用できる。

3. 事前アンケート分析結果

2章の最初に述べた [b] について、現在進められているエネルギー変換技術を中心に、各技術の現状と課題および研究推進方法について事前アンケートを実施した（アンケートフォームは付録参照）。

3.1 希薄分散エネルギー活用技術の現状と課題に関するアンケート結果

表 3.1 にアンケート回答から抜粋した各エネルギー変換技術における課題を示す。それぞれの技術固有の課題があるが、電極や蓄電技術等、キーワードとしては共通のものもいくつかある。

各技術の詳細は4章で述べられるが、「希薄分散エネルギー活用技術」の共通課題として、「極めて微弱なエネルギー」であること、および「変動するエネルギー」であることに起因する課題がある。これまでの研究動向として、大きなエネルギー（大電力、ワイドギャップ、光では短波長）に向かう研究は精力的に行われているものの、微弱エネルギーへの取り組みは意外に盲点となっている部分がある。微弱エネルギーに対して高効率の変換技術は重要課題の一つである。また希薄分散エネルギーの持つ「変動する」という本質的な特徴から、出力の平準化と蓄電技術も課題として挙げられる。

図 3.1 は各技術の目指す方向（課題解決によって実現できる方向）を素子の大きさと電力容量について纏めたものである。図からわかるように、電力容量向上は共通の課題となっている。一方大きさについては、小型化を目指す方向と大面積化を目指す方向の両方がある。

表 3.1 希薄分散エネルギー活用技術課題アンケートまとめ (表中 E はエネルギーの略)

E 源	熱 E	振動 E	電磁波 E	太陽光 E	太陽光 E	化学 E	化学 E	熱 E	重力加速度 E			
名称	熱電素子を用いた微小温度差発電	マイクロ環境振動発電器	無線電力伝送	印刷で作る超低コスト太陽電池	ドットクスフロー重合太陽電池	光駆動型燃料電池	バイオ燃料電池	バイオ電池	電子機器側(人が携帯)での対応事例	体重を利用したマイクロ発電機		
E変換技術	接合技術: pn及び異種金属電極	・エレクトレット材料成膜及加工法: 高安定高表面電荷	・新整流用ダイオード開発			・反応効率の向上 ・基質の展開 ・還元末端の展開	・電極改良(長期安定性) ・素子の積層法(異分野融合)	生体触媒を電極触媒とする技術				
周辺技術	E 給電技術	高効率DC/DC変換	密度 ・低コスト、高信頼(低共振周数・大振幅振動構造開発)	電磁波送信器(通信と同等)	太陽光発電	太陽光発電+光触媒		・生体触媒(酵素)安定性向上(酵素工学) ・ナノ/マイクロ多子性炭素材料と、マイクロ空間への生体触媒固定化技術	整合前の広帯域マッチング	発電時間拡大: マイクロ発電機		
	E蓄電技術	Eマネージメント: バッテリー又はキャパシタ		可能(キャパシタ等類和性良)	光二次電池	水素				メカニカル(発条等)蓄積回路技術	2次電池への充電技術	
	回路技術	・発電電流反転時給電 ・蓄電・放電技術	多様状況対応高効率電圧変換・充電回路	1チップ化(MMIC)	くし型電極					・超低電圧動作 ・高効率	・充電回路/変換回路 ・低電力無線回路技術	
	実装技術	希ガス封入	高変換効率化: 振動E-電気Eの構造最適化		新規開発	既存技術		・積層回路/パッケージ技術等: 異分野融合		高度直接電子移動を目標にした多面的アプローチ	時・用から様々	
	基礎物性	性能指標向上: ・電気伝導率 ・熱伝導率 ・ゼーベック係数		・電磁波整流での電気-電気変換/同波変換			・反応機構の解明: 水分子の活性化過程	・E変換素子 ・高効率化			・ゼーベック効果 ・電波受信	

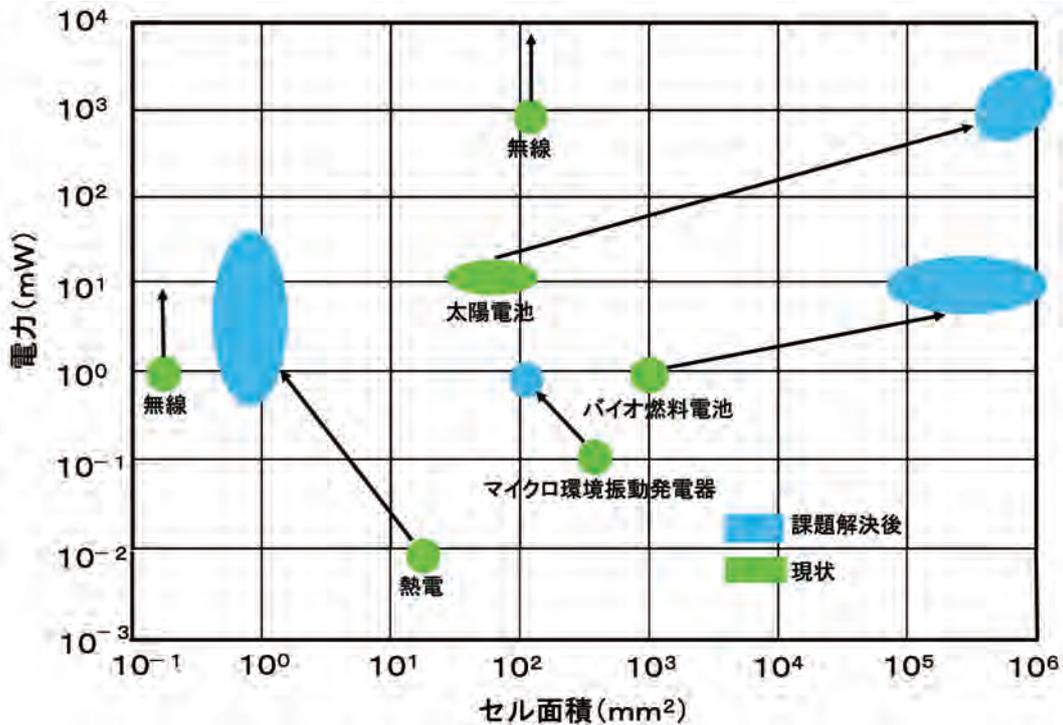


図 3.1 各エネルギー変換技術の目指す方向

3.2 研究推進方法に関するアンケート結果

表 3.2 研究開発推進方法 (5W1H) に関するアンケート結果まとめ
(表中 E はエネルギーの略)

E 源	熱 E	振動 E	電磁波 E	太陽光E	太陽光 E	化学E	化学E	熱E	重力加速度E
What: ターゲットは何か	・常温低温度差熱発電電付センサ、ICタグの開発 ・常温低温度差の発見、創生	・充電器基本構造の研究開発 ・2次構造の研究開発;用途特定システム開発 SNW, 移動体医療, 農業	・電磁波の省効率受電整流技術 ・最適な電磁環境形成のための送電技術	・再生可能E利用拡大 ・環境低負荷社会の実現	可視光駆動で電流3倍効果を発揮する燃料電池の開発	・生体埋め込み型デバイス ・1W程度携帯電話充電装置 ・バイオマスE変換系やアルコール燃料電池	・酵素・微生物燃料, 食料中の化学Eの電気E変換素子 ・装置技術開発 ・携帯機器用二次電池(併用)分散E集約	・携帯電子機器: 腕時計, 携帯音楽機器, ゲーム機, 携帯電話? ・パワースポット充電	健康管理システム(スマート体重計)
Who: 単独or 合同	合同	どちらもあり	複数技術者の連携	合同	可視光駆動: 主に特定大学G, 燃料電池電極; 産と合同G	既に推進中の5グループ位の連携	合同	産官学が複数でコンソーシアム	合同
Where: 産官学のどこ	産: 敏感素子センサ・ICタグ, 官: NIMS 学: 複数の特定大学	学+産	産学官連携	産学連携	主に、学と産	・分野融合学組織中心 ・産学連携	産官学	JSTファンド, 学は基礎, 産は物作り	産学連携 大学が全体をコーディネート
When: 開始時期	H21から	出来るだけ早く	すぐに	今すぐ開始可能	直ちに	早急の対応が必要	1年準備期間: 産官学	2008年	今すぐ
研究期間	5年	5年位でじっくり	3年 5年(LSI)		当面5年間		次年度より, 5年をめぐり	最大5年	3年
Why: 何故(今) 必要か	・センサやICタグの技術発展↑, 導入拡大の背景 さらにそれを加速し生活の利便性に寄与	日本, エレクトレット材料等優位, 海外: フライブルク大等のPJ立上, ベンチャーの急増	電磁波利用技術の商用化の一手前, パッシブな電磁波利用の期待大, コピキタス社会発展	開発時間大→早い取り組みが必要	持続社会構築→化石燃料依存のE体系を自然E(太陽光)利用型に	・ここ2~3年出力が, μA レベル→mA レベル ・我が国の地位確保	・安全目付携帯用発電装置ニーズ大 ・E源利用は食と融合しない	精技術進化の必然的方向	回路まで含めた発電技術で世界のリーダーシップを取れるのは今。
How: 研究体制, 推進方法	官を攻め, 産学独自テーマ, 最終的に独法研でプロトタイプ評価	基礎研究開発Gr: 材料開発, 基本構造開発, 設計解析法構築等, アプリ研究開発Gr: 発電システム	半導体開発, 回路開発, システム開発の三位一体研究推進	産学連携コンソーシアム	ERATO*, やCREST**型基礎研究を実施後, コンソーシアム型による実用化研究	・基礎から応用までの融合G及び総括G ・要素技術開発・各Gの産と連携強化, スパイラル的目標達成	総括班の各研究Gコントロール体制 ・多面的アプローチ可能な体制必要, 微生物触媒研究グループ	CREST等?	デバイスのみならず, 回路設計, システム設計といった3位1体の研究開発体制が必須。

* ERATO: JST 総括実施型研究プロジェクト、 ** CREST: JST チーム型基礎研究プロジェクト

表 3.2 に研究開発推進方法 (5W1H) に関するアンケート結果をまとめた。この中で「Why」の項は研究に投資する意義にも関連するので、その内容を以下に述べる。

- ・電源の問題解消による利便性向上：センサや IC タグの技術はめざましく発展している。そこで必ず浮上する電源コードや電池交換の問題が解消されることになり、そのインパクトは大きい。これは社会生活の利便性向上に大きく寄与する。
- ・化石燃料依存から自然エネルギー利用型への転換：希薄分散エネルギー活用により得られるエネルギー量は、地球規模の化石エネルギー消費を低減できるほどの大きさを目指している訳ではない。しかし身の周りにある多くの電子機器が希薄分散エネルギーによって駆動できるようになれば、エネルギー消費に対する基本概念を変える程の大きなインパクトとなる。(希薄分散工

エネルギーの活用により将来代替の可能性がある機器の生産台数、電池の販売個数について付録 7 参照。)

- ・ 研究開発期間の長さ：3.1 の各エネルギー変換技術に共通する課題の中で材料探索が重要であることが示されている。このような材料探索は非常に長い時間がかかる。最近のシミュレーション技術の進歩による材料探索時間の低減はあっても、他の研究に比べると長い時間がかかる事は否めない。そのため出来るだけ早い取り組みが必要である。

欧米の動向に対する位置付け：日本のエネルギー変換技術のレベルは世界的にも高水準にある。一方「Power MEMS」¹と題する EU 発の国際シンポジウムが 2003 年より EU 内で開催されており、本 WS で取り上げた「希薄分散エネルギー活用技術」に関連する研究への高い関心が窺われる。更に最近、フライブルク大 IMTEK (Institute for Microsystem Technology) で未利用な希薄分散エネルギー活用技術に通じる“Micro Energy Harvesting”プロジェクト²が民間 (SIEMENS、enoncean、SICK、EH、Weidmuller 社等) からの支援を受けてスタートしている。幹線系への再生可能エネルギーを活用する大きな取り組みで、国際的にも有名なドイツのフライブルク市の中心であるフライブルク大が、微細な電力への研究にも目を向け始めた事は無視できない。また EU におけるエネルギー関連ベンチャーや米国エネルギー省の SBIR³ (Small Business Innovation Research) 支援によるベンチャー企業 (例：EoPlex 等) の台頭等はエネルギー変換技術全体に欧米が国／企業レベルで学を後押しする形であり、今のままでの国内の取り組みで、世界水準を維持することへの警鐘と考えられる。それを回避するためにも早い国レベルの取り組みが必要である。

参考ホームページ

- 1 <http://www.powermems.org>
- 2 <http://www.imtek.de/meh/>
- 3 <http://www.sba.gov/SBIR/>

4. エネルギー変換技術と課題

本章では、各種エネルギー変換技術に関して、それぞれの現状と研究開発課題を述べる。

4.1 熱電素子を用いた微小温度差発電

井上 誠 (コマツ)

4.1.1 技術の原理と特徴

P、N 型半導体を結合して図 4.1.1 のように一方を加熱、他方を冷却して温度差 ΔT をつければ、その大きさに比例した起電力 V が生じる ($V = \alpha \times \Delta T$)。この効果を発見者の名にちなんでゼーベック効果といい、 α をゼーベック係数と呼ぶ。実際のモジュールは図 4.1.2 に示すように、P 型、N 型半導体が多数個、電極によって直列に結合され、その上はセラミック絶縁基板に覆われている。このモジュールの熱電変換効率の最大値は、 $\eta_{\max} = \Delta T / T_h \times (M-1) / (M+T_c/T_h)$ 、 ΔT は高温側の温度 T_h と低温側の温度 T_c の差 ($T_h - T_c$) で $\Delta T / T_h$ はカルノー効率を表す。 $M = (1 + ZT)^{1/2}$ で表され、ここに Z は (ゼー

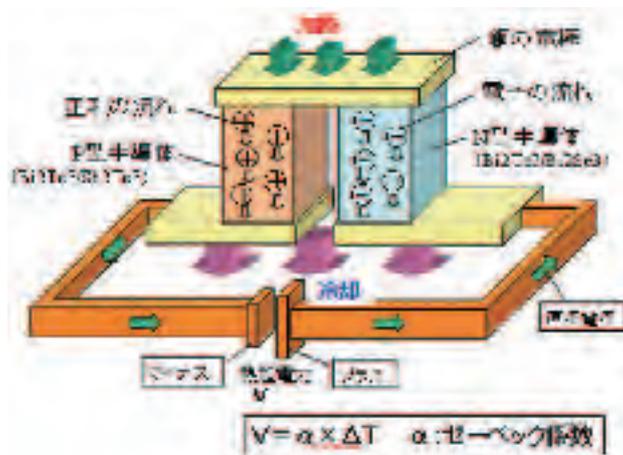


図 4.1.1 熱電発電の原理

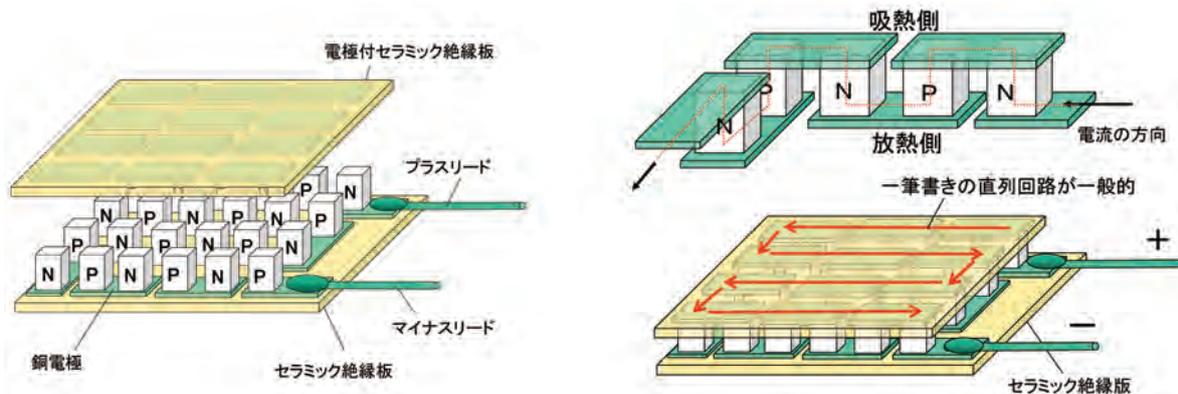


図 4.1.2 熱電モジュールの素子と電極の配列

ベック係数)² × (素子の電気伝導度) / (素子の熱伝導率) で ZT は無次元数となり無次元性能指数と呼ばれる。

以上から η_{\max} は、温度が決まれば ZT の大きさで決まる。この ZT はモジュールの大きさによらず、いくら小さくしても性能は変わらない。これが、他の熱機関との大きな違いである。効率のよい排熱回収熱機関としてスターリングサイクルやランキンサイクルが提案されているが、いずれの機関も小さくなると、気体や流体の流動損失や、回転体の軸受けの摩擦損失が、出力に比較して非常に大きくなり効率が非常に低下するが、可動部のない直接変換の熱電素子ではサイズによらず効率は同一である。また構造が他の熱サイクルと比較して著しく簡単で、超小型化に向いている。

4.1.2 エネルギー変換効率の現状と将来予測

上述したように、熱電モジュールのエネルギー変換効率の最大値は ZT による。 ZT の年代による推移 (図 4.1.3 参照) をみると、2000 年までは長年にわたり 1 が限界であったが、超格子薄膜の形成技術が開発されて急激に性能が向上 2 以上に達する報告も出てきた。これは、1993 年に MIT の Hicks 等が材料をナノオーダーまで薄くすると、量子サイズ効果により ZT が増大することを理論的に示し¹⁾、これがきっかけとなり薄膜の研究が一気に盛んになった結果である。1999 年には MIT の Dresselhaus 等が、材料の構造が 2 次元

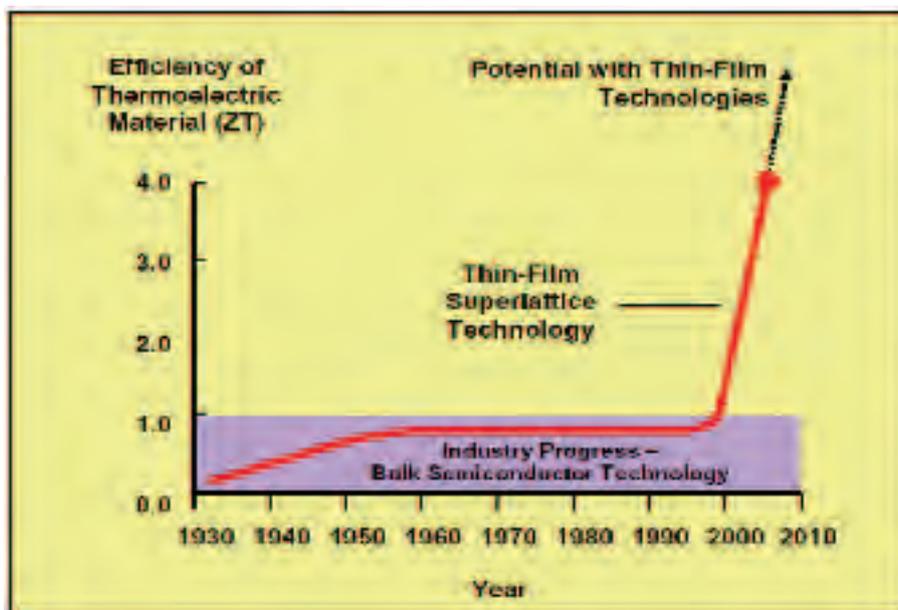


図 4.1.3 ZT の年代推移

(薄膜) から1次元(量子細線)、零次元(量子ドット)と次元がさがるにつれZTが増大し3以上も理論的には可能であることを示した²⁾。

一方、最大発電出力は $P_{max}=1/4 \times Z \times K \times \Delta T^2$ で表すことができる。Kはモジュールの熱コンダクタンスである。出力はZより ΔT の方が影響が大きいことがわかる。

薄膜では温度差 ΔT を大きくとれないため実際にモジュールを作ると、効率も低く出力も得ることができないため実用化にはいたっていない。発電に使うためには厚膜で、ZTの改善を図る必要がある。計算科学を活用しての物質の創生も可能になってきているので、厚膜でZT=3を狙いたい。

常温付近の希薄エネルギーから電気を回収する場合の効率を上述の式を使い計算してみる。 $T_h=300$ K、 $ZT=1$ として $\Delta T=10, 5, 1$ Kとすると、 $\eta_{max}=0.55, 0.27, 0.05$ %となる。 $ZT=3$ になると $\eta_{max}=1.09, 0.53, 0.10$ %と約2倍の効率が得られる。最大発電出力は実用化されているZの最大値 $6.0 \times 10^{-3}/K$ 、熱コンダクタンスとしてセラミック基板使用して面積 1 cm^2 の場合の $0.3 \text{ W}/K$ を使うと、 $\Delta T=10, 5, 1$ Kの場合 $P_{max}=1.8 \text{ mW}, 45 \text{ mW}, 180 \text{ mW}$ となり、 ΔT の増加の影響が非常に大きいことがわかる。

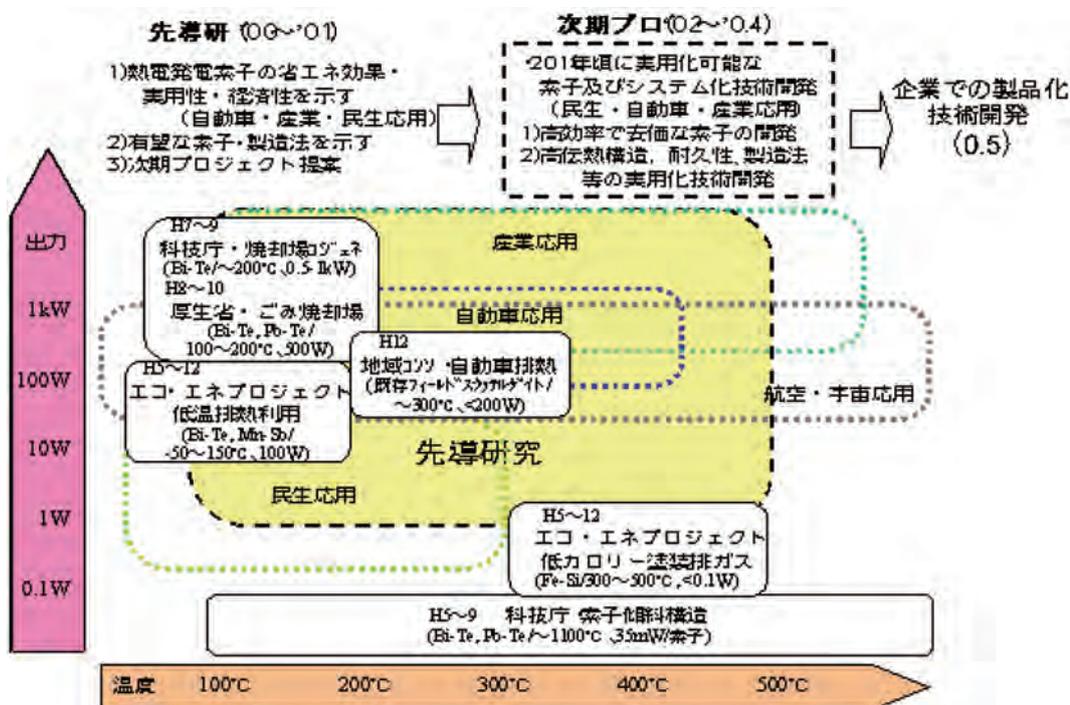


図 4.1.4 熱電発電実用化・開発状況

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

4.1.3 熱電発電開発状況

いままでも、排熱回収の有望技術の一つとして熱電発電の開発は国家プロジェクトにとりあげられて、図 4.1.4 に示すように行われてきた。しかし対象とする温度範囲は 100 °C 以上の高温で、出力も数 W 以上から kW 級と大きなものであり、希薄分散エネルギーを対象とする研究開発は実施されていなかった。これは、mW 以下の出力の利用先が見つからなかったためであるが、近年の各種センサ、ID タグなどの新技術の普及と、消費電力低減の技術進歩により mW 以下で十分作動する機器が増加してきたため、熱電発電の活用分野として注目される。

4.1.4 研究開発課題

(1) 課題 1 Z 向上のための新材料開発

希薄分散エネルギーは、拡散したエネルギーで無限にあると考えられるので、変換効率はエネルギー消費の面からは、それほど重要ではないが効率が上がれば必要な材料を削減でき、低コスト化につながるし設置面積をより小さくできるので Z 向上は必要である。現在のバルク材料と異なる製法が種々開発されつつあり、そのなかで計算科学による新材料の創生に大きな期待がかかる。

また、超格子薄膜では、2 以上の性能がでているので、これをいかに厚膜化できるかが課題である。

(2) 課題 2 希少資源を使わない新材料の開発

いま、常温付近で最も性能が高いのはビスマステルル系で P 型は $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ で N 型は $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ である。これに使われている材料はいずれも希少材料で、採掘可能期間が Bi は 58 年、Sb は 12 年、Se は 58 年と短い。そのため、これらの材料を使わない新材料の開発が必要である。シリコン系や酸化物系の開発が期待される。

(3) 課題 3 常温付近での利用可能な温度差 ΔT の発見

熱電発電も熱機関の一種であるので、その駆動のためには温度差 ΔT が必要である。

1. 体温と大気との温度差
2. 夜間の放射冷却と裏面の大気との温度差
3. 自動車エンジンルーム内のエンジンからの輻射熱と大気との温度差

などが考えられるが、 ΔT の大きさや時間的な変動など定量的なデータの収集が必要である。また無尽蔵の大気からエネルギーを取り出す方法として、アインシュタインも感心したと伝えられる有名な水飲み鳥 (図 4.1.5) と同様に水の蒸発熱を利用して温度差を取り出す方法が考えられる。表 1 に示す湿度計の乾球と湿球の温度差と同じ温度差を水さえあれば大気から作り出すことができる。このコンセプトをいかにシステムとして実現するかが課題である。なお



図 4.1.5 水飲み鳥：平和鳥（水を燃料にした熱機関）

表 1 水と大気から作り出せる温度差

乾球温度 (°C)	乾球温度と湿球温度の温度差(°C)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	100	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47
38	100	94	87	81	75	70	64	59	54	49	45
36	100	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
34	100	93	86	80	74	68	62	56	51	46	41
32	100	93	86	79	73	66	61	55	49	44	39
30	100	92	85	78	72	65	59	53	47	41	36
28	100	92	85	77	70	64	57	51	45	39	33
25	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36	30
24	100	91	83	75	68	60	53	46	39	33	26
22	100	91	82	74	66	58	50	43	36	29	22
20	100	91	81	73	64	56	48	40	32	25	18
18	100	90	80	71	62	53	44	36	28	20	13
16	100	89	79	69	59	50	41	32	23	15	7
14	100	89	78	67	56	46	37	27	18	9	
12	100	88	76	65	53	43	32	22	12	2	
10	100	87	74	62	50	38	27	16	5		
8	100	86	72	59	46	33	20	8			
6	100	85	70	55	41	27	13	0			
4	100	83	67	51	35	20	5				
2	100	82	64	46	29	12					
0	100	80	60	40	21	2					

体温を熱源にしたものとして、日本の時計メーカー 2 社が限定販売した熱電時計がある。

(4) 課題 4 熱電素子にかかる ΔT をいかに大きくするか

上述した温度差が見つかったとしても、実際に熱電素子で利用できる温度差は加熱側、冷却側の熱交換器、セラミック基板や半田などの熱抵抗により、大きく ΔT がロスしてしまうことが考えられる。特に薄膜の場合は熱電素子の熱抵抗が他の部分に比較して非常に小さくなるため、熱電素子にかかる温度差は非常に小さくなる。熱抵抗の小さい熱交換器、セラミックに変わる熱伝導のよい絶

縁材料、部材接合部の熱抵抗低減方法の開発などが大きな課題である。

(5) 課題5 発電場所で電力を使える用途の開発

希薄分散エネルギーから発電した電気は、その場所で使用するのが原則である。発電出力も数mWかmW以下と小さいために、適用先はいままでほとんどなかったが、センサやIDタグに利用できる可能性が出てきた。これらの超低消費電力化と同期して開発を進めるべきである。

(6) 課題6 蓄電技術の開発

(3) で述べた温度差は、変動するものがほとんどであるので、発生した電力を一時的に貯める超小型の蓄電技術の開発が必要である。

(7) 課題7 低コストの製造法の開発

現状の熱電素子モジュールは一部の工程にロボットが導入されているものの、人手が多くかかり、コストが高いし大量生産向きではない。半導体製造工程などを利用した大量生産方式の開発が、実用化には必要である。

これらの課題の内、(5) (6) の課題は各方式に共通課題であるので、共通テーマとして実施したほうがよい。

参考文献

- 1) L.D.Hicks,M.S.Dresselhaus: Phys. Rev. B, 47, 12727-31 (1993).
- 2) M.S.Dresselhaus et al.: Phys. Rev. B, 47, 16631-34 (1993), Appl. Phys. Lett.,74, 4005-7 (1999).

4.2 マイクロ環境振動発電器

鈴木 雄二 (東京大学)

環境振動発電は、人体の運動、移動体の振動、空調による空気のゆらぎ、配管の振動などから微小な電力を得ようとするものであり、系統電源から分離した小電力デバイスを長期間保守なしに使用可能とする付加価値の高いエネルギー源を提供することが目標である。例えば、自動車でもハーネス（配線）は3 km程度あるが、システムが複雑化するほど配線は長大化し、ヘリコプターでは20 km、大型旅客機では100 kmを超える。そこで、センサ、コンピュータと通信する無線チップ、そして環境から発電するマイクロデバイスを一体化したシステムを用いれば、配線が不要となり、配線の重量、コストの低減、設計の自由度増大などのメリットが生まれる。また、現在、コイン型の酸化銀電池、リチウム電池について、ほとんどがリサイクルされることなく廃棄されており、電池が不要となれば重金属や電解質液による環境汚染の危険性をなくすることが可能となる。

エレクトレットを用いた静電誘導は振動エネルギーから電気エネルギーへ変換する有望な手法の一つと考えられる。エレクトレットは、誘電体に電荷を打

ち込んだものであり、その寿命は数十年以上と長く、半永久的に静電場を発生させることができる。マイクロフォン、集塵機では古くから実用化されており、エレクトレットを利用した発電器も 1970 年代に提案されている。

図 4.2.1 に、振動型エレクトレット発電器の概念図を示す。発電器は、くし形にパタニングされたエレクトレット膜および対向電極、振動子、大振幅を許容するバネ構造、電力変換回路からなる。図 4.2.2 にエレクトレット発電器の原理を示す。エレクトレットにより形成される静電場によって対向電極に誘電電荷が生じ、エレクトレットと対向電極の重なり面積を変化させることによって、外部回路に交流電流を発生させることができる。

Boland ら¹⁾ は、等価回路を用いて、外部負荷抵抗 R を最適値に選んだときに、最大発電出力が次式で表されることを示した。

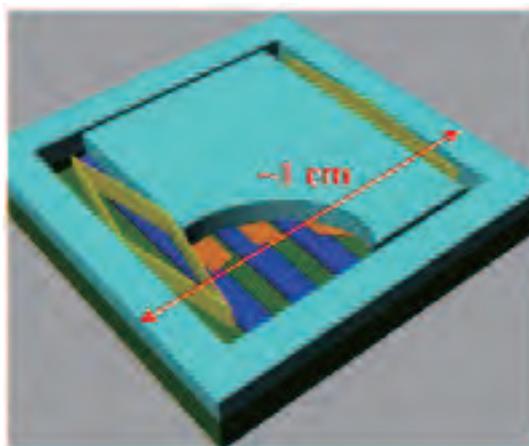


図 4.2.1 マイクロ・エレクトレット発電器の概念図

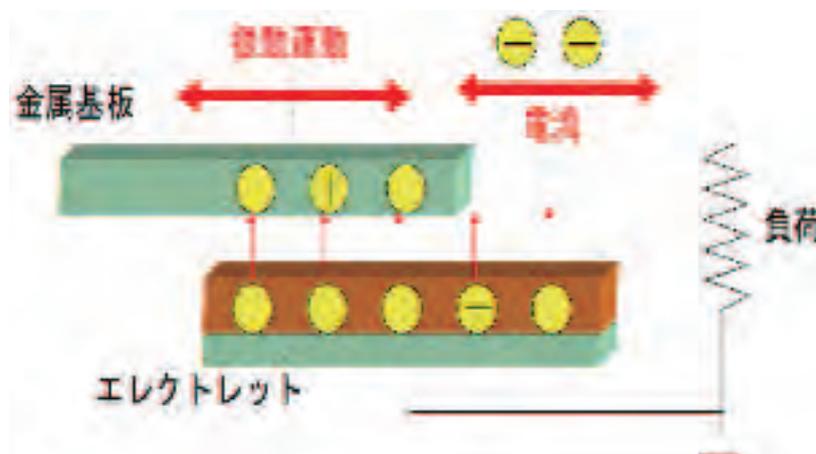


図 4.2.2 エレクトレット発電器の原理

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

$$P_{\max} = \frac{\sigma^2 \cdot nAf}{4 \frac{\epsilon\epsilon_0}{d} \left(\frac{\epsilon g}{d} + 1 \right)} \quad (1)$$

ここで、 σ 、 d 、 ϵ は、エレクトレット膜の表面電荷密度、厚さ、誘電率であり、 g 、 A 、 f 、 n は、エレクトレットと対向電極の間隔、電極の面積、振動周波数、くし形電極を用いた場合の1振幅あたりの極数である。上式から示唆される重要なポイントは、発電出力が周波数、すなわち振動子の移動速度に比例することである。一般に電磁誘導では発電出力は速度の2乗に比例し、そのため、大型かつ高速振動（あるいは回転）の発電器では、電磁誘導が有利となる。逆に、環境振動のように周波数が低く、しかも小型であることを特徴とする発電器では、速度が小さく、従って、電磁誘導よりも静電誘導が原理的に有利である。

ごく最近、マイクロ・エレクトレット発電器への応用を目指して、エレクトレット材料の研究が再び活発化している。式(1)のように、発電出力は表面電荷密度 σ の2乗に比例し、エレクトレット膜の性能が発電出力に大きな影響を与える。堤野ら²⁾は、アモルファスフッ素樹脂の1種であるCYTOP（旭硝子製、CTL-M）が、従来材料の3倍以上の表面電荷密度を与えることを示している。CYTOPはガラス転移温度が108℃と低く、エレクトレットとしての耐熱性もそれほど高くない。実用面からは、高温下でも電荷の減衰しないエレクトレット材料が望ましいが、その面では新しい材料開発が必要である。しかし、樹脂の中での電荷トラップのメカニズムの知識は少なく、今後さらに表面電荷密度、耐熱性を向上させるときの理論的指針は乏しい。誘電体内の電荷のトラップ、移動については、現在では高圧ケーブル被膜の絶縁破壊特性の評価のために研究されているに留まり、第一原理計算などより学術的な手法によって電荷トラップメカニズムを解明していく必要があると考えられる。

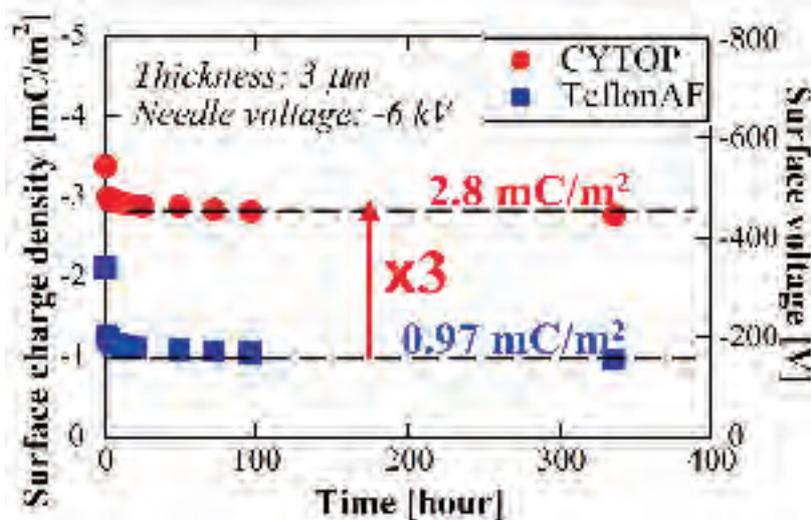


図 4.2.3 Teflon AF および CYTOP のエレクトレット性能の比較

振動発電器は、単純なバネ・マス・ダンパー系と考えることができる。振動子の質量、バネ定数を m 、 k とし、発電器はダンピング係数 C を持つ速度比例のダンパーとしてモデル化される。外部の振動の角振動数を ω 、振幅を y_0 とすると、発電器によって得られる最大出力（電力） P_{\max} は、外部振動によって振動子が共振状態になったときに得られ、

$$P_{\max} = \frac{1}{2} m y_0^2 \omega^3 \frac{z_{\text{lim}}}{y_0} \quad (2)$$

のように書ける³⁾。ここで、 z_{lim} は、発電器内部で振動子が移動できる最大振幅である。従って、アプリケーション、すなわち、設置場所を決めたとき、 ω および y_0 は予め与えられる量であるので、設計パラメータとしては振動子の質量 m と最大振幅 z_{lim} のみであり、マイクロ振動発電器ではこれらによって理論的最大出力が定まる。例えば、 $m=1$ g、 $\omega=2\pi \times 100$ Hz、 $y_0=10$ μm 、 $z_{\text{lim}}=1$ mm とすると、1.2 mW となる。ただ、環境振動発電の多くのアプリケーションにおいて 1 mW は十分な電力と考えられ、むしろ、数 10 μW でも十分実用に耐えうる。

環境振動発電器のバネ構造では、環境振動と共振できるように共振周波数が低く、かつ大振幅振動を可能とするバネ構造が必要である。鈴木ら⁴⁾は、図 4.2.4 に示すような高アスペクト比樹脂バネ構造のためのマイクロマシン技術を確立している。このバネ構造は、バネの幅 20 μm 、アスペクト比 20 のポリパリキシリレン (parylene-C) 製であり。単結晶シリコンよりもヤング率が 40 倍小さく、脆性破壊しない特徴を活かして、共振周波数 20 Hz 程度と極めて低く、振幅 1 mm 以上を達成している。環境振動発電では、数年以上の超長期にわたって連続して使用可能であることが求められ、総振動回数は 10^9 以上となる。マイクロ構造、特に樹脂構造についての疲労特性はほとんど判って

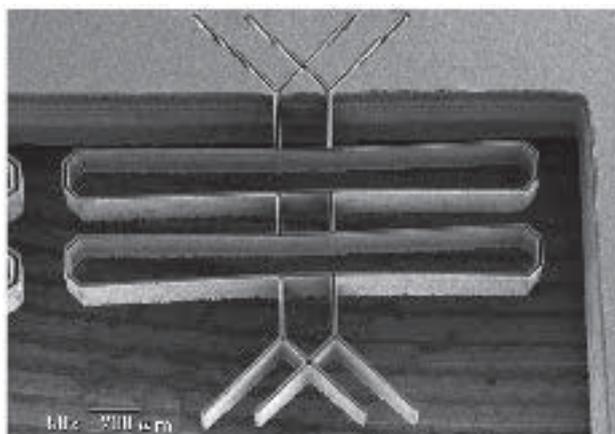


図 4.2.4 パリレンを用いた MEMS 樹脂バネ構造

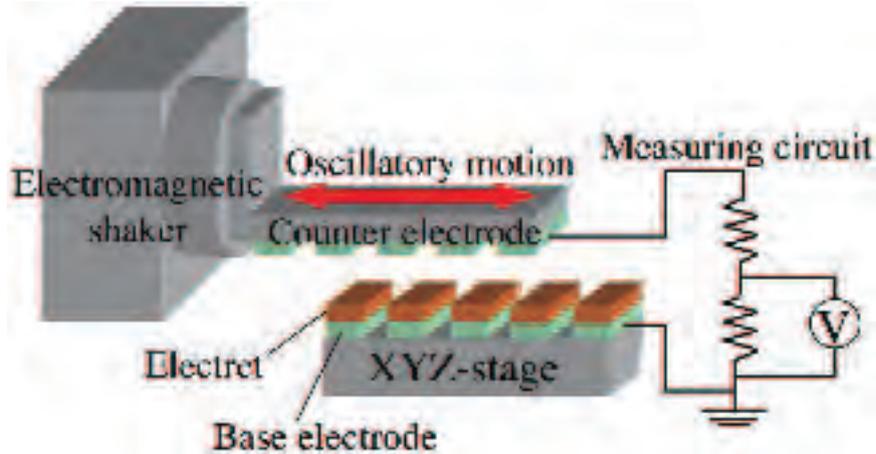


図 4.2.5 強制振動発電実験装置

ならず、材料面からの特性解析が求められる。

図 4.2.5 に、エレクトレットによる静電誘導によって、どの程度の発電出力が得られるかを確認するための強制振動発電実験装置を示す。上下の基板は大きさ $20 \times 20 \text{ mm}^2$ であり、膜厚 $15 \mu\text{m}$ の CYTOP 膜および対向電極に、マイクロマシン技術によって $150 \mu\text{m}$ 幅の櫛歯状のパタニングを施したものをを用いた。エレクトレットと対向電極は微動ステージを用いて傾きを調整して平行とし、 $40 \mu\text{m}$ 間隔で対向させて固定した。そして、電磁式加振器（APS Dynammmics Inc. 製、Model 113）により対向電極を水平方向に振動させ、外部負荷抵抗に対する出力電圧と電流値を計測した。なお、エレクトレットの表面電位は -550 V であり、極板間での放電を防ぐため、絶縁破壊強度が空気の約 2.5 倍である SF6 雰囲気下で実験を行った。

図 4.2.6 に、周波数 20 Hz 、振幅 1.2 mm_{p-p} の振動条件下での出力特性を示す⁵⁾。外部負荷抵抗 $4 \text{ M}\Omega$ に対し最高出力 0.59 mW が得られ、低周波数においても高い出力が得られるエレクトレット発電器の特性が確認された。また、このとき、出力電圧は 186 V_{p-p} であり、電磁誘導とは異なって低周波数でも高い電圧が得られることが示される（図 4.2.7）。従って、エレクトレット発電器の出力を使用するためには、直流に整流し、電圧を下げるための電力変換回路が必要となる。一般には、チャージポンプなど昇圧回路の開発は多くなされているが、高効率の減圧回路はほとんど存在せず、電子回路面での研究開発も必要である。

環境振動発電は、自立型デバイスのための究極の電源として様々なアプリケーションで期待されており、今後の展開が期待されている。環境振動から電力を得るマイクロ発電器では、エレクトレット発電器が原理的に有利と考えられるが、マイクロマシン技術をはじめとする製作技術の進歩と同時に、電荷トラップやマイクロ構造疲労破壊の学理の発展が今後必要となると考えら

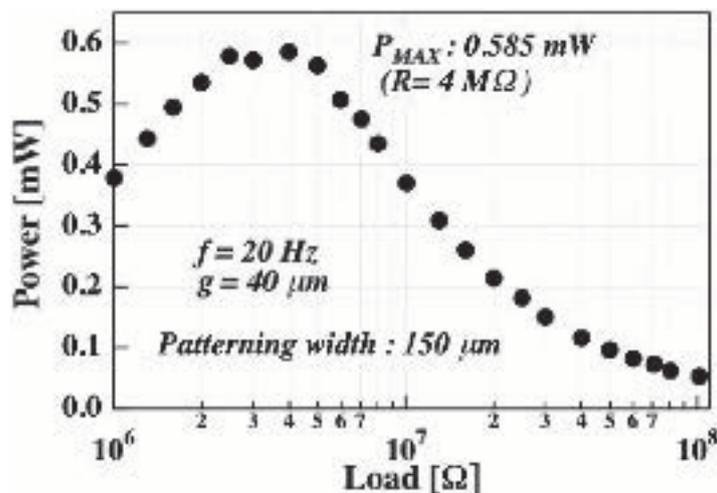


図 4.2.6 エレクトレット発電機の発電出力と外部負荷抵抗の関係

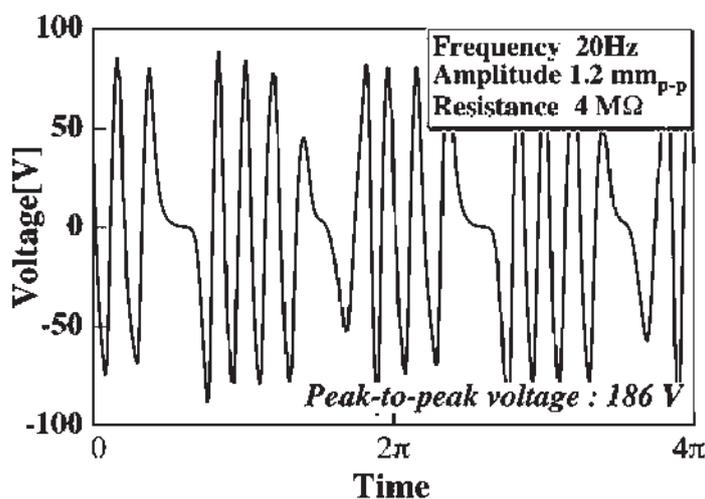


図 4.2.7 エレクトレット発電機の電圧出力

れる。これらの研究開発によって、現状では 0.1 mW/cm^2 程度の発電密度を 1 mW/cm^2 程度に向上させることができると考えられる。

一方、PZT をはじめとする圧電素子は、発電機への応用が極めて容易であることが利点であるが、低い共振周波数を持ち、高繰返し振動に耐える構造の設計が難しい。世界的に見ると、我が国はエレクトレット発電機では最も優れた成果を挙げてきているが、海外の研究グループは圧電素子を用いる例が多く、今後の動向を観察していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Boland, J., Chao, C.-H., Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., "Micro electret power generator," IEEE Int. Conf. MEMS '03, Kyoto, pp. 538-541, (2003).
- 2) Tsutsumino, T., Suzuki, Y., Kasagi, N., and Sakane, Y., "Seismic power

generator using high-performance polymer electret,” IEEE Int. Conf. MEMS’ 06, Istanbul, pp. 98-101, (2006).

- 3) Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M., Holmes, A. S., “Architectures for vibration-driven micropower generators,” J. Microelectromech. Syst., 13, pp. 429-440, (2004).
- 4) Suzuki, Y., and Tai, Y.-C., “Micromachined high-aspect-ratio parylene spring and its application to low-frequency accelerometers,” J. Microelectromech. Syst., 15, pp. 1364-1370, (2006).
- 5) Sakane Y., Suzuki, Y., and Kasagi, N., “High-performance perfluorinated polymer electret film for micro power generation,” 7th Int. Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2007), Freiburg, pp. 53-56, (2007).

4.3 電磁波エネルギー変換

篠原 真毅 (京都大学)

4.3.1 はじめに

電磁波は他のエネルギー源とは異なり、自然界に存在するものは小さすぎて希薄分散エネルギーにすらなりえないが、幸い、人間の生活に欠かせない通信等で使われている電磁波が擬似自然エネルギーのように当たり前に存在しているため、これを希薄分散エネルギー源と見なし、技術でエネルギーを取り出すことが可能となる。しかも他の技術と異なり、希薄分散エネルギーを利用する際に情報を電磁波で外部とやり取りするアプリケーションでは必ず電磁波のやり取りが存在するため、その人為的に発生した電磁波を利用できる、つまりエネルギー密度をある程度制御することも可能であるという他にはない特徴がある。想定できる電磁波密度は以下のようなレベルである。

- $< 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (通信電波) (エネルギー視点なし)
- $10\text{-}100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (RF-ID 級システム) (電波法の縛り。通信と併用)
- $< 1 \text{mW}/\text{cm}^2$ (人が居る場合の最大システム) (生体への安全性の縛り)
- $> \text{数 - 数十 } \text{W}/\text{cm}^2$ (閉鎖空間) (半導体の限界)

20世紀初頭にはニコラ・テスラが電磁波による無線電力伝送の有用性に気づき、実際に実験も行っているが、当時の技術ではエネルギー密度を高めることが難しく、また逆に希薄分散エネルギーで動作するアプリケーションもなかったために成功しなかった。しかし、21世紀に我々は技術とアプリケーションを有するため、テスラの夢を復活させることが可能である。

4.3.2 エネルギー変換技術

電磁波エネルギーの電気エネルギー変換は、エネルギーの種類としては同じマックスウェル方程式で記述されるエネルギーであるため、実際には電磁

波 (RF) として適している MHz-GHz の周波数を DC-50 (60) Hz に変換する技術である。小型で高効率にエネルギー変換するためにはダイオードを使って GHz (マイクロ波) を DC に変換することが最も適しており、電磁波を収集するアンテナとダイオードを使った整流回路を組み合わせたレクテナ (RECTifying anTENNA) が用いられる。アンテナと整流回路は特に決められた形はなく、一般の通信等で用いられているアンテナや回路であればすべて用いることができる。

レクテナはマイクロ波を高効率で整流するために、ダイオード一つを回路に並列に挿入し、出力側に $\lambda/4$ 線路とキャパシタを組み合わせた「シングルシャント整流回路」がよく用いられる (図 4.3.1)。これは半導体増幅器の F 級のように高調波合成を用いて全波整流するもので、理論効率は 100 % である。しかし、この理論効率はダイオードが抵抗 0 の完璧なスイッチとして動作する場合の理論であり、実際のダイオードには様々な物性があるため効率が減少する。過去に開発されたレクテナでは 2.45 GHz、4 W 入力で 90 % という高効率を実現しているが、RF-DC 変換効率に入力電力依存性が存在し、最大 90 % のレクテナも入力が低すぎると数%以下の効率に下がってしまう。特に希薄分散エネルギー応用を考えた場合、特にダイオードに立ち上がり電圧 (正電圧をかけても電流が流れない電圧) が存在するために、RF-DC 変換効率の低下が起こるため、現在希薄分散エネルギー入力時の高効率化に向け以下のような様々なアプローチがなされている。研究はすべて $10-100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度

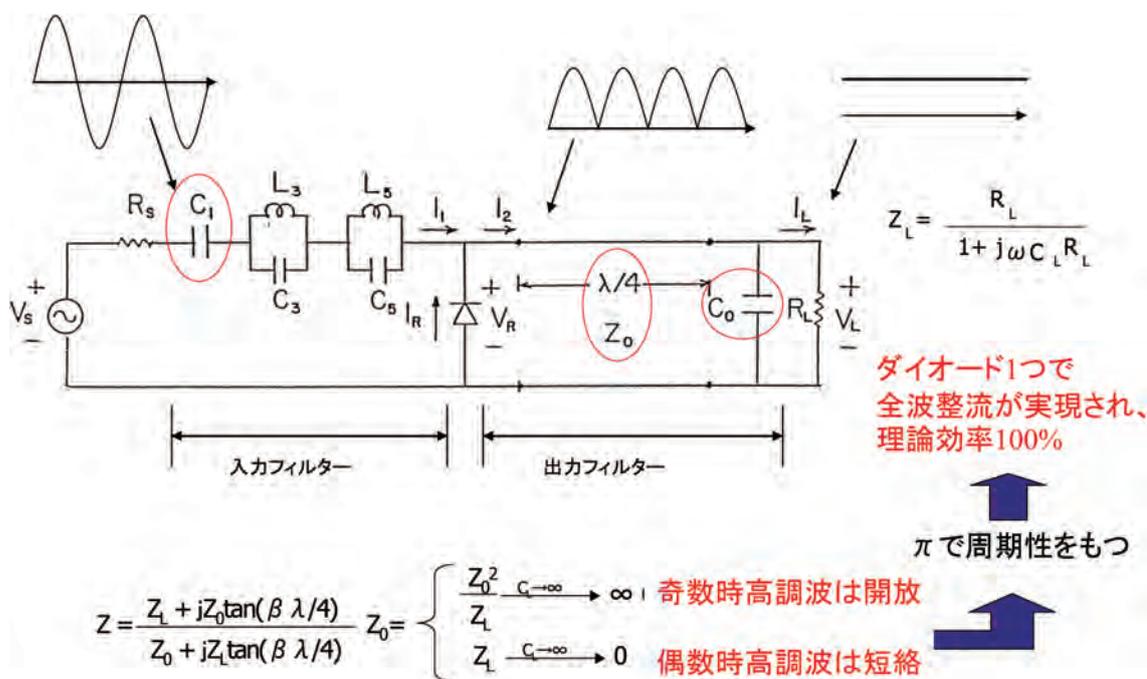


図 4.3.1 レクテナ整流回路 (シングルシャントモデル) の整流理論 [1]

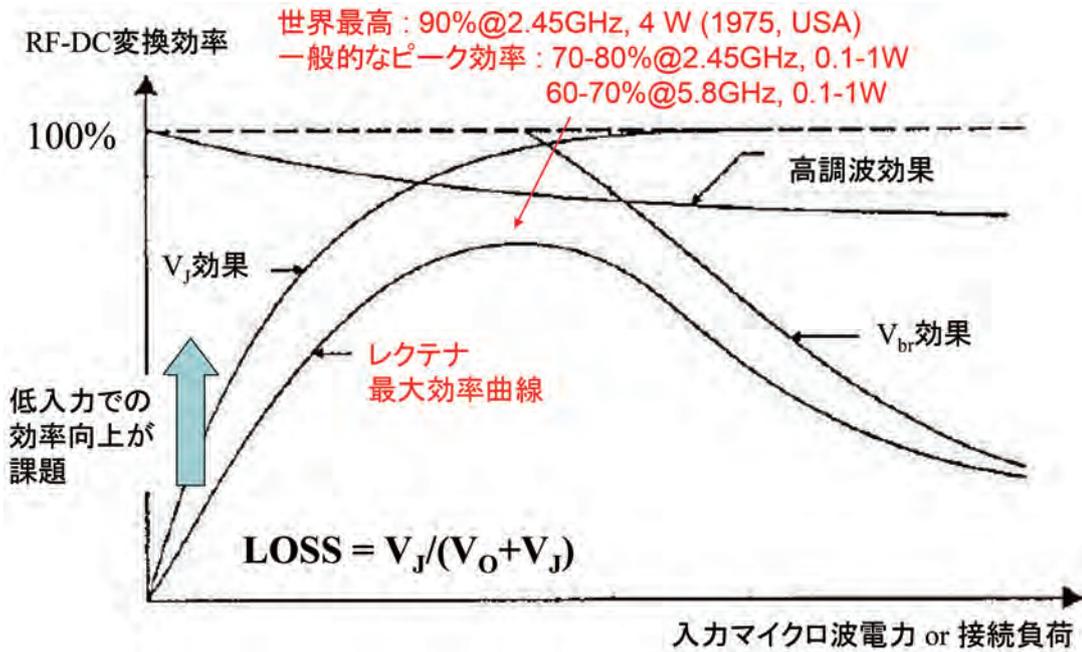


図 4.3.2 レクテナ整流回路の RF-DC 変換効率の一般特性

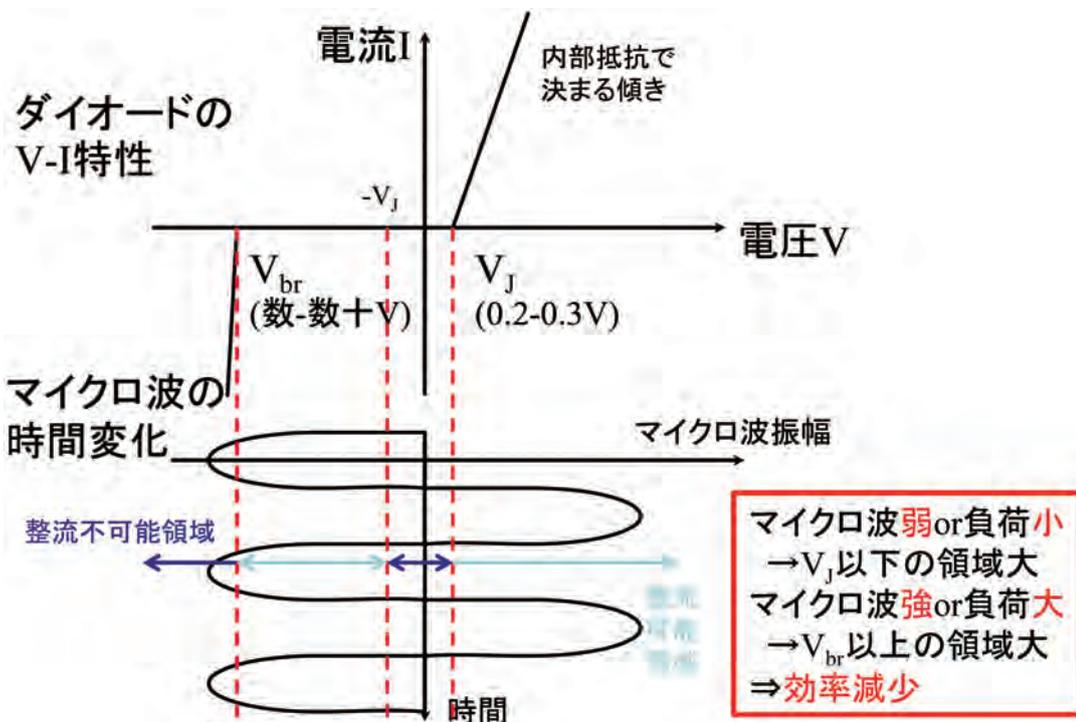


図 4.3.3 ダイオード特性と RF-DC 変換効率

の RF-ID 級を想定して行われている。

- 弱電用整流回路の開発

- 共振器利用による自己バイアス - 40 % @900 MHz 帯、-20 dBm (東北大、2006)
- 反射波利用による自己バイアス 63 % @5.8 GHz、10 mW (岡山大、2004)
- 出力フィルター最適化による自己バイアス 50 % @2.45 GHz, 0.1 mW or 5.8 GHz, 1 mW (京都大・三菱電機、2006) (図 4.3.4)
- キャパシタによる昇圧回路込み 1 V_{output} @900 MHz 帯、-15.3 dBm (三菱電機、2006)

- アンテナの開口径拡大による入力マイクロ波の増加 50 % @5.8 GHz, 0.3 W/m² (NICT、2004)

獲得エネルギーは (電磁波密度) × (受電面積) × (変換効率) × (時間 (充電)) で計算されるが、電磁波利用の場合、電磁波密度が可変であることは先に述べたが、受電面積はアンテナの性能で決めることができ、変換効率は整流回路の性能で決めることができるという特徴もある。アンテナアプローチは整流回路への入力電力を増やすことで結果としての高効率化を狙ったものである。

整流回路の効率向上に限れば低入力整流に適したダイオードの開発が待たれる。立ち上がり電圧が 0 であるゼロバイアスダイオードも現在存在するが、

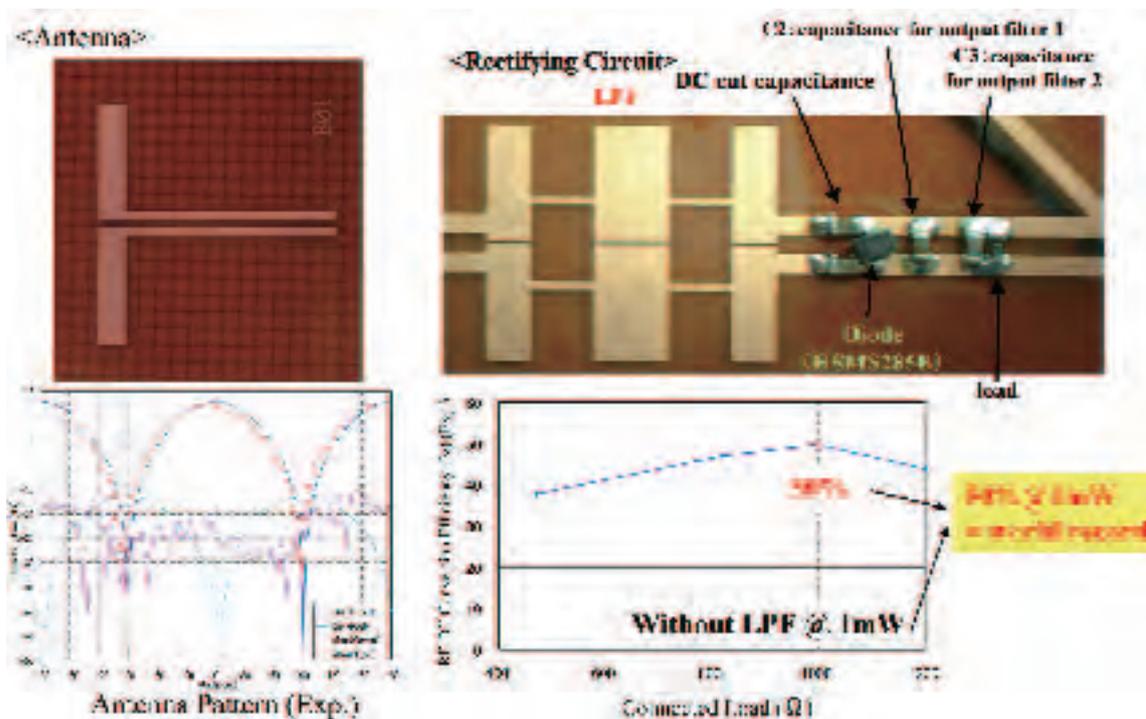


図 4.3.4 京大開発の弱電レクテナ

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

整流回路として用いると効率がまだ低く、内部抵抗や内部キャパシタ、電子の移動度等、立ち上がり電圧以外のパラメータの変化や、整流回路として組み込んだときの不整合等で効率が上がらず、課題が残っている。また、現状の研究レベルは RF-ID 級、つまり電磁波の発生源を専用にもつような電力密度を想定したものが多く、携帯電話やラジオ波のような準自然エネルギーといえる $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度以下をターゲットにした研究が少なく、また課題も多いのが現状である。

4.3.3 おわりに

電磁波利用のエネルギー収穫は、これまで「無線電力伝送」と呼ばれ、送電器が存在することが前提のシステム研究がほとんどであった。60年代にアメリカで有線に代わるという位置付けで、宇宙太陽発電 SPS を目指した 2 定点間の高効率「送電」の研究が多く行われ、80年代以降研究の中心が日本に移っても移動体への「送電」という視点の研究がほとんどであった。しかし、そこで培われたレクテナ技術と、RF-ID という希薄分散エネルギーに少し近づいたシステムの実用化が後押しし、アメリカの PowerCast 社が RF-ID 級の電力を希薄分散エネルギー源としたクリスマスツリーの LED 点灯のシステムを売り出すところまで発展した。しかし、電磁波利用は未だ通信とレーダーのものであり、エネルギー利用は学会の中でも規模が小さく、大きな研究規模に発展しにくい。「希薄分散エネルギー」というカテゴリーが電磁波のエネルギー利用の研究を推進することは疑いない。

4.4 色素増感太陽電池

瀬川 浩司 (東京大学)

4.4.1 太陽光の利用拡大への期待

地球に到達する太陽エネルギーは大気圏外で 1 m^2 当たり 1.38 kW 、地表では、 1 m^2 当たり 1 kW 程度となる。この地球全体が太陽から受けるエネルギーは、地表や海面で熱に変わり、その一部は風や波、海流などを起こすエネルギー源となる。化石燃料も元を質せば太陽エネルギーが地中に蓄積されたものである。もし仮に地球全体に降り注ぐ太陽エネルギーを 100 % 変換できる技術があれば、世界の年間消費エネルギーを僅か 1 時間で賄うことができる。化石燃料使用量の抑制の観点から、自然に広がる各種エネルギーにかける期待は年々高まりつつある。中でも太陽光発電は、実用的太陽電池の量産が始まって以来 40 年余り、自然エネルギーを回生するデバイスの雄として大きな役割を果たしてきた。太陽電池の利用が求められる理由は、以下のようにまとめることができる。

(1) 太陽光は無尽蔵で枯渇の心配がない。また発電による CO_2 増加がな

いので地球環境問題への対応に資する。持続可能な経済社会の構築に寄与する。

- (2) エネルギー需要の大部分を海外に依存している日本にとって、安定供給に貢献する。
- (3) 太陽光発電は電力需要量の多い夏季や昼間に多く発電するため、電力負荷平準化（ピークカット効果）に貢献する。
- (4) 太陽エネルギーは地域分散型であり、輸送によるエネルギー損失を抑えられる。

しかしながら、太陽光発電導入量において世界をリードする日本でさえ、現状は年間 83 万 kW 程度の導入量（2005 年）に過ぎず、我が国の年間の全エネルギー消費量の中では 0.1 % にも満たない。次世代の発電システムの開発は待たなしの状況にあるが、太陽光発電の飛躍への課題はコストである。太陽光発電導入状況を見ると、平成 5 年度から 15 年度末までの間に導入量は約 36 倍に拡大し、システム価格は約 1/5 まで低減したものの、発電コストは依然高い。

4.4.2 色素増感太陽電池に期待される役割

こうした状況の中で“色素増感太陽電池”と呼ばれる新型の有機系太陽電池が注目されるようになった（図 4.4.1）。この電池は高純度のシリコン半導体を使わず、ヨウ素溶液を介したシンプルな電気化学セル構造を持つのが特徴で、

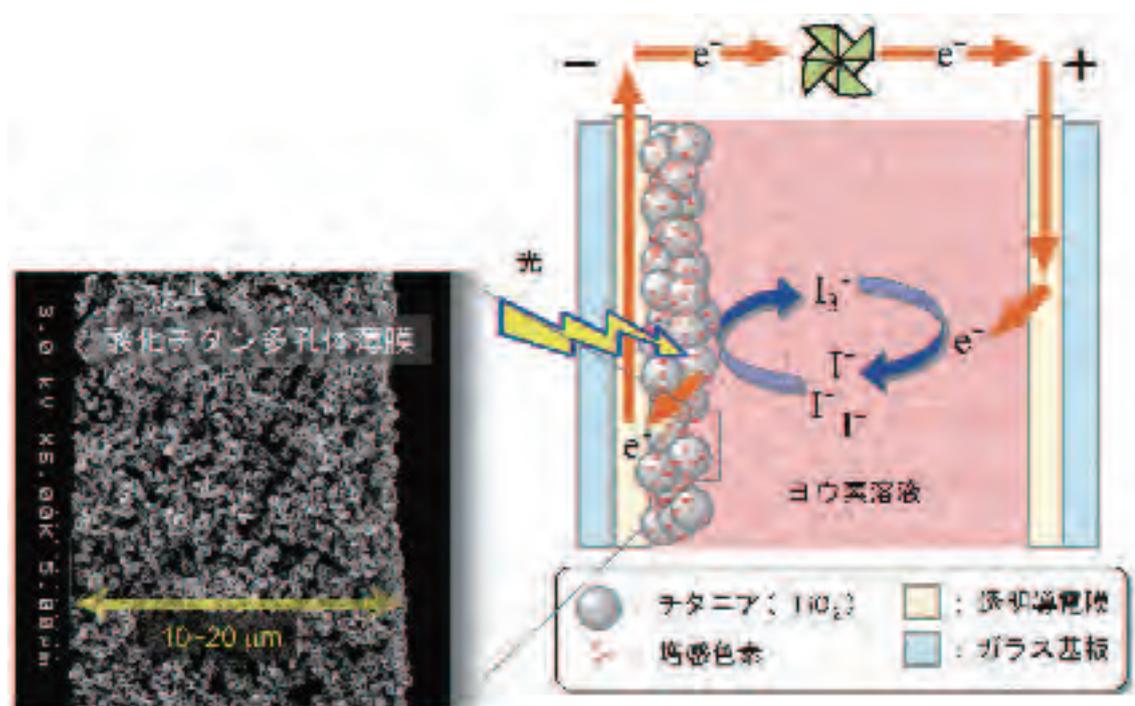


図 4.4.1 色素増感太陽電池の模式図

電解質溶液の酸化還元反応を伴うことから“光合成”に例えられたりする。

数ある太陽電池の中で色素増感型が注目される理由はいくつかあるが、非常に都合が良いことに、この電池は屋外晴天時の1/10～1/100といった光量の小さな条件でも光電変換効率が落ちない。また、製造時における二酸化炭素排出量（LC-CO₂）が圧倒的に少ないというのも魅力の一つである。控えめな試算でも、結晶シリコンの1/10以下であると言われている。このことは即ち、製造が容易で低コストであるということをも意味する。特に、真空プロセスを必要とせず、印刷手法によって作製が可能ことから、フィルム状の基材を用いて“Roll to rollによる超低コストデバイス”の生産も可能と考えられる。結果、“発電する壁紙”といった屋内向けの各種用途が期待される。他、毒性元素を含まない・環境負荷も小さいなど、時代の要請に即したデバイスでもある。理論的なエネルギー変換効率は、単セルで33%、タンデムではそれ以上と考えられるが、現状では10%程度にとどまっている。しかしながら今後数年で技術開発が進み15%は超えるものと考えられる。

4.4.3 微弱光の利用に向けて

こうした膨大に降り注ぐ太陽光エネルギーについては、いわゆるシリコン製の太陽電池によってエネルギー回収が試みられてきたが、より人間環境に近い場における微弱光に関しては、顧みられることはなかった。なぜなら、太陽光エネルギー自身も他のエネルギー源（石油・原子力・各種二次電池）と比べて密度が圧倒的に薄く、既存の高価な太陽電池ではコスト的に見合わないからである。更に深刻なのは“光量依存性”の問題で、シリコン太陽電池は蛍光灯のほのかな明かり、といった微弱光に関しては指数関数的に変換効率が下がることが知られている。このため、仮にコストの問題に目をつぶったにしても、技術的にこうした希薄な光エネルギーを回生する手段はまだ無いということになる。この点について、色素増感太陽電池は微弱光下でのエネルギー変換効率が高く（図4.4.2）将来有望である。

4.4.4 今後の展望

色素増感太陽電池は設備コストの負担が小さく印刷手法による製造も可能（図4.4.3）なことから超低コスト化が期待され、日本だけでも300社を超える企業が調査や研究開発に関わっている。海外でも多くの大学、国立研究機関、ベンチャー企業などが研究開発に取り組んでいる。このような低コスト化が達成されれば、「発電する壁紙」をはじめとして屋内のような微弱光下でもさまざまな用途展開が実現できる（図4.4.4）。しかしながら実用化に至るには性能とコストと耐久性の全てをバランスさせる必要があり、まだまだ解決すべき課題も多い。特に、希薄エネルギーの活用という観点からは、今後は発電した

エネルギーをその場で局所的に（デバイス内で）化学エネルギーとして蓄積するようなシステムの構築が本電池実用化への鍵を握っていると考えられる。例えば、太陽電池自身に蓄電機能を付与した「光二次電池」（図 4.4.5）や、「レドックスフロー型太陽電池」（図 4.4.6）が考えられる。

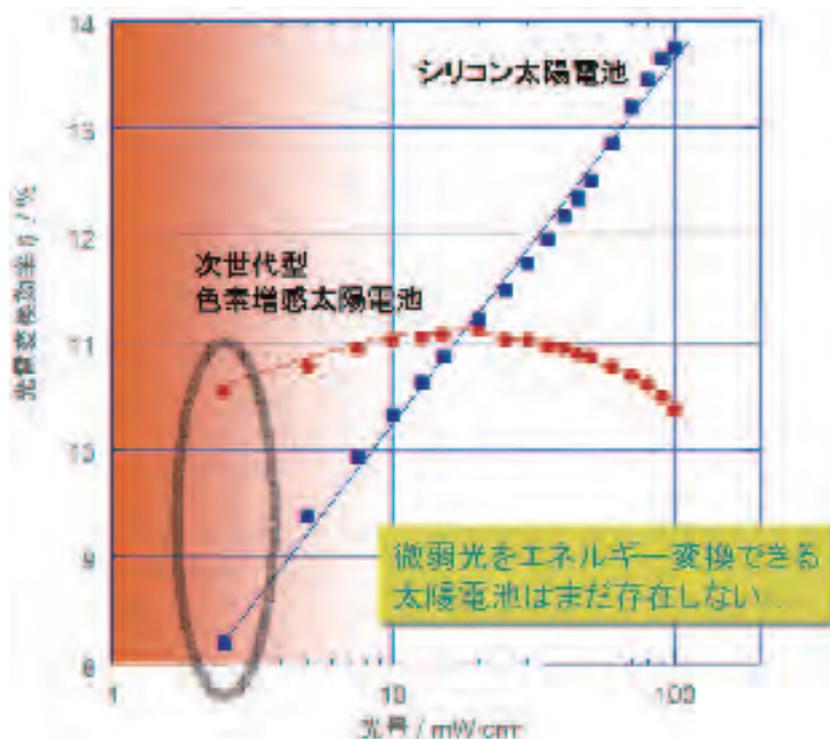


図 4.4.2 屋内希薄光エネルギーの利用

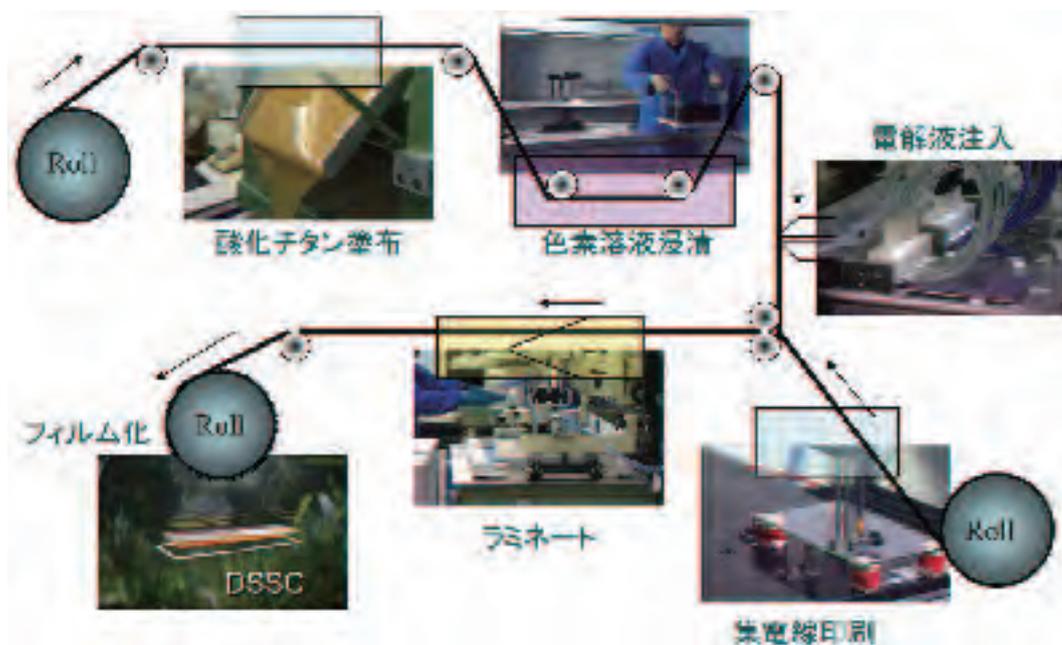


図 4.4.3 超低コスト太陽電池の生産に向けて～フィルム太陽電池の連続生産構想～

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

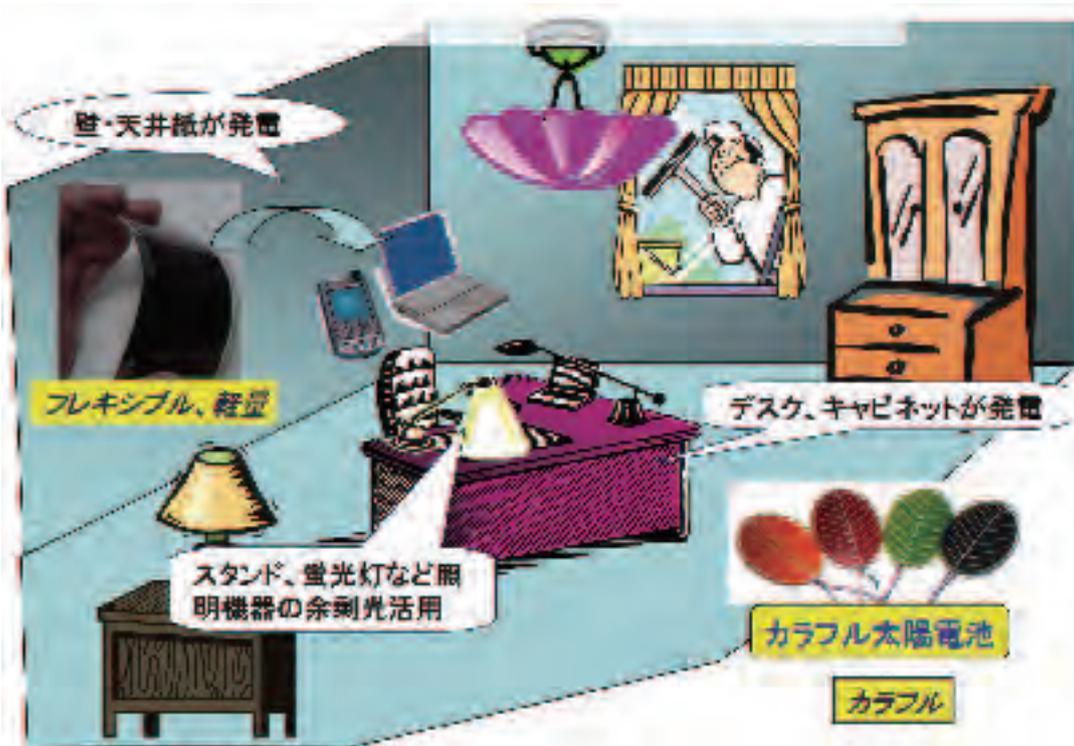


図 4.4.4 屋内用途でも新展開（発電する壁紙など）
～微弱光でも活躍する有機系太陽電池～

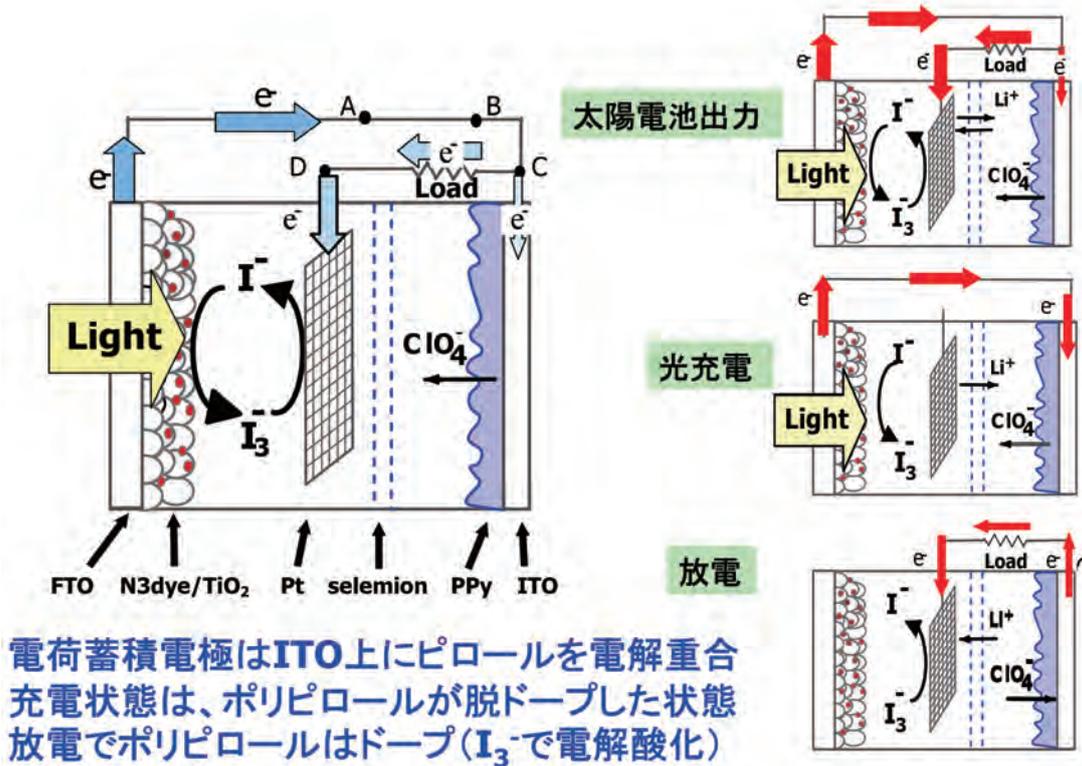


図 4.4.5 エネルギー貯蔵型色素増感太陽電池

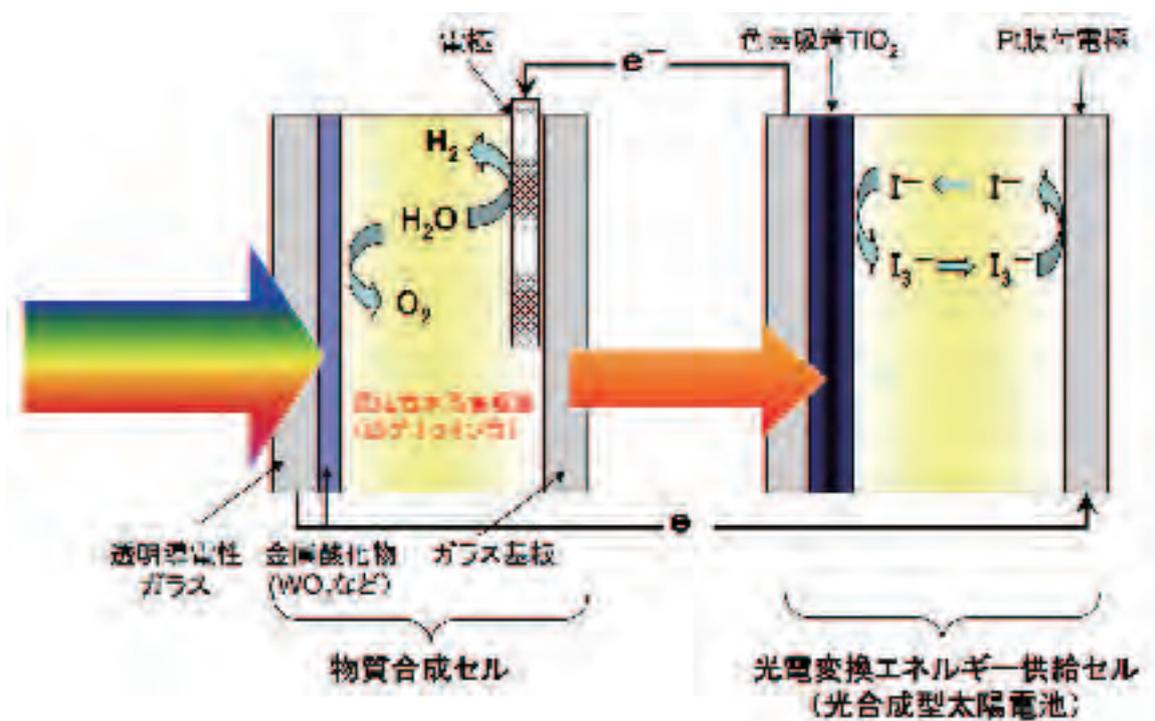


図 4.4.6 レドックスフロー型太陽電池
～水素エネルギー回収型タンデムセル～

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

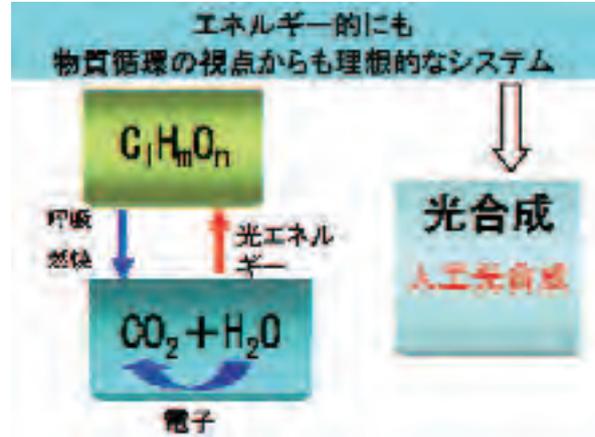
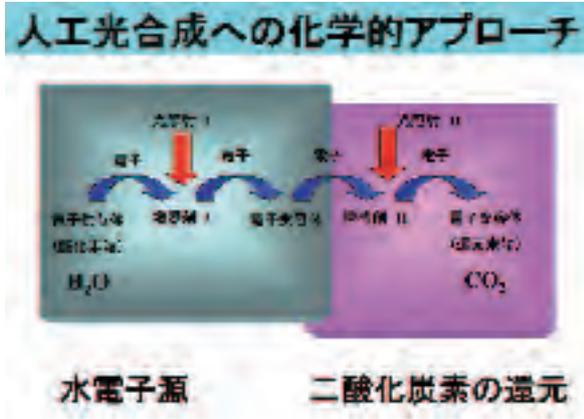
6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

4.5 可視光駆動型燃料電池 - 1光子8電子変換 (電流8倍効果) -

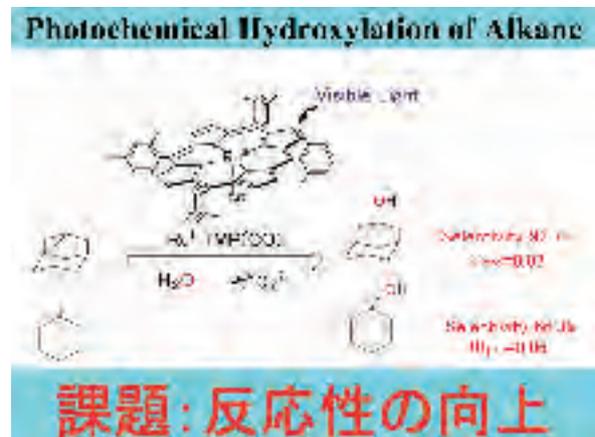
井上 晴夫 (首都大学東京)

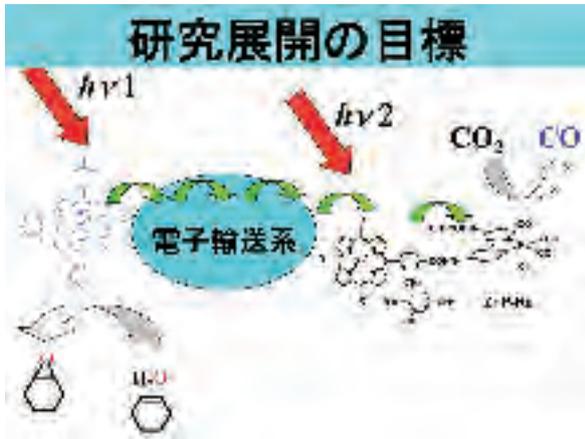


- ・ 第一世代人工光合成研究で
 - ・ 未解決の課題
- 1) 光捕集系の構築 (反応中心と共役)
 - 2) 高効率電子移動
 - 3) 水分子を電子供与体とする
光酸化還元
 - 4) 反応中間体の制御
 - 5) 反応系のシステム化

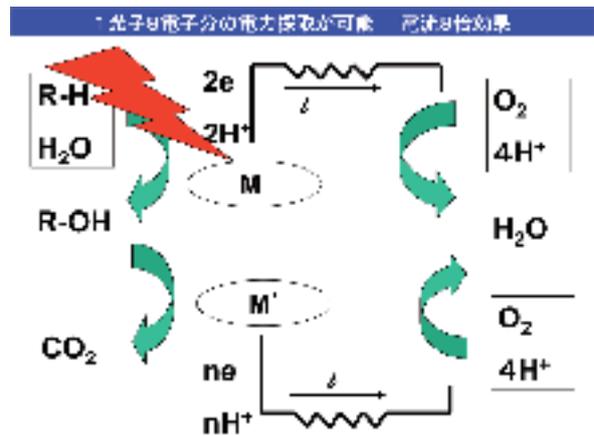
- 水分子から如何にして電子を引き抜くか?
($H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$)
- 1) One electron
 - 2) Two electrons
 - 3) Multi electrons

- 水を電子源とする人工光合成システムの構築
- * 反応効率の一層の向上
 - * 基質の展開 (アルケン、アルカン、水)
 - * 反応機構の解明
 - * 還元末端の展開 (水素、二酸化炭素)
 - * 反応系システム化への取り組み





- ### 研究展開の目標
- 1) 水を電子源として 電力を採取
 - 2) 水を電子源として 水素を製造
 - 3) 水を電子源として 二酸化炭素を可視光還元



1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

4.6 バイオ燃料電池

谷口 功 (熊本大学)

4.6.1 はじめに

世界のエネルギー事情を勘案して、最近、未来のエネルギーとして、バイオマスから直接電気エネルギーへの変換への挑戦が始まっている。例えば、グルコースはバイオエネルギー源としても興味深く、酵素反応を利用したバイオ燃料電池は小型で簡単な構造のものが作成できるので、持ち運び型や医療用微小電池として期待できる。特に、グルコース—空気生物燃料電池は 1.2 V 程度の起電力を有する有望な燃料電池系で、また最近、電流が mA/cm^2 レベル、出力が mW/cm^2 程度のものが作製されるに至って、様々な応用の道が現実味を帯びてきた。

糖類の酸化反応は、これまで、食品産業の廃水処理や血液中の糖の分析（センサ）などを目的として幅広く行われてきた。しかし、糖類の酸化反応は一般に比較的ポジティブな電位領域で生じるため、その化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換することは困難と考えられてきた。一方、電極の開発によって、糖類の酸化反応を酸素の還元電位よりもネガティブな電位で進行させるこ

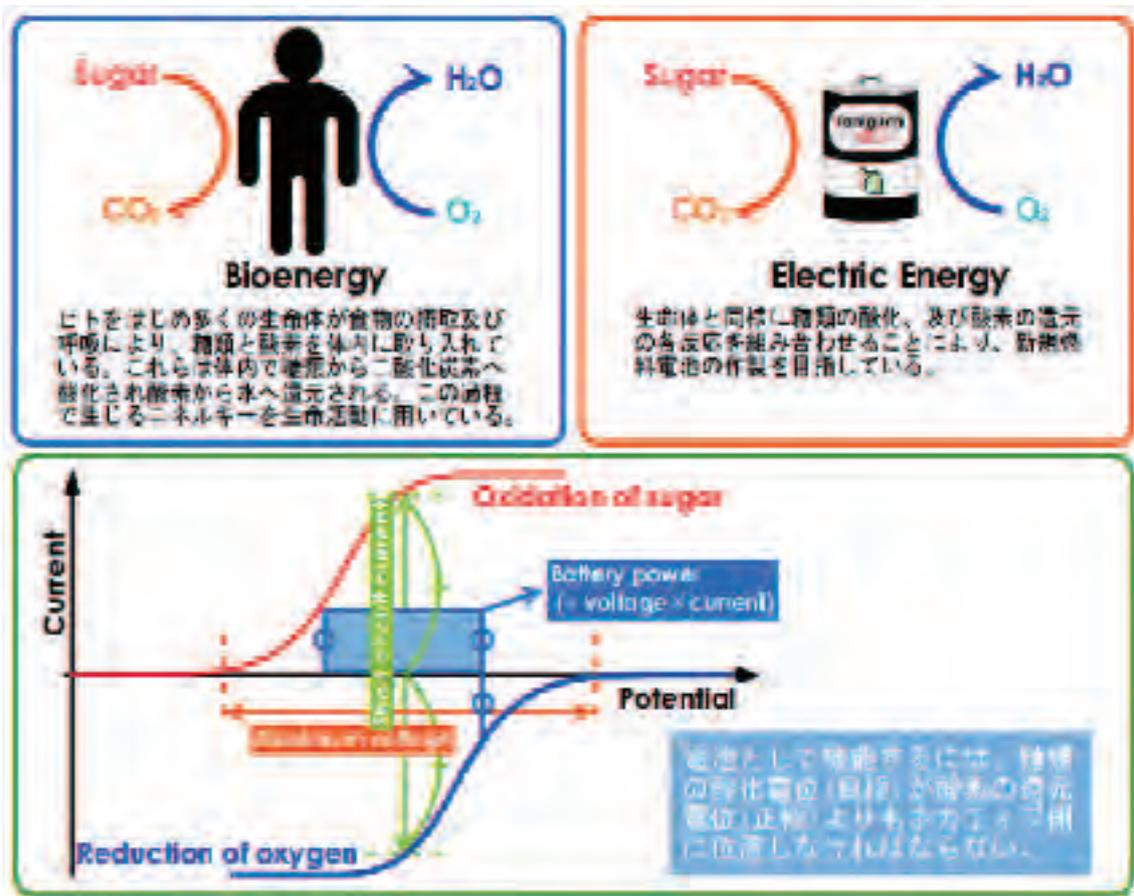


図 4.6.1 燃料電池の構成のために必要な電極反応の電位の関係

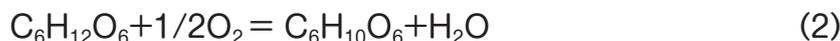
とができれば、これらの電極反応を組み合わせる糖—空気燃料電池を構成できる（図 4.6.1）。この種の「バイオ燃料電池」は、様々なバイオエネルギー源から電気エネルギーを取り出す仕組みの電池である。特に、生体内や自然界で、未利用のあるいは、希薄で分散したエネルギー源の変換に利用することが可能である。

4.6.2 グルコース—空気反応のエネルギーと生物燃料電池の起電力

最も簡単な糖であるグルコースの酸化反応は、自然界の光合成の逆反応で（(1) 式で表され総計 24 電子反応）、熱力学的には、 $\Delta G = -2,872 \text{ kJ/mol}$ （ $1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ kJ}$ から、 $798 \text{ Wh}/180 \text{ g}$ - グルコース = 4.43 Wh/g - グルコース）である。



よく知られた $\Delta G = -nFE$ の関係から、この反応に基づく燃料電池は理論的には最大 1.24 V の起電力が得られる。水素エネルギーシステムの基盤である水の理論分解電圧（ $\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ ）が 1.23 V であることを考えても、グルコースの酸化反応は自然界が利用している反応の中でも最も大きな起電力を有するものである。生体内では、多くの酵素反応系のカスケード的な反応によって上記の 24 電子反応が生じている。今、酵素を触媒とした (2) 式で表される最初の 2 電子反応



によるグルコノラクトン生成反応について計算すると、起電力は 1.18 V （ $\Delta G \approx -230 \text{ kJ/mol} \Rightarrow 63 \text{ Wh}/180 \text{ g}$ グルコース = 0.35 Wh/g グルコースで酸素—水素燃料電池とほぼ同じ）となる。

生体は、この種のエネルギー源から得られる化学エネルギーや熱エネルギーを利用しているが、生体とは異なって、電気エネルギーの形で取り出すものがバイオ燃料電池である。

4.6.3 酵素電極を用いたグルコース—空気生物燃料電池

グルコースの酸化には、酸化酵素やグルコース脱水素酵素が利用できる。これに酸素（空気）還元のための酵素電極を組み合わせ、バイオ燃料電池が作製できる。酵素は、多くの場合、電極上で直接酸化還元できないためメディエータ分子が電極反応の効率化のために利用される（図 4.6.2）。しかし、最近では、メディエータ分子を用いない酵素の直接電子移動型の酵素電極も知られるようになってきている。例えば、オスミウム錯体のポリマーをメディエータとして GOD と共に固定化した電極でグルコースを酸化し、同様にメディエータとラッカーゼあるいはビリルビン酸化酵素（BOD）固定化電極を組み合わせたシステムが提案されている。GOD に代えてグルコースデヒドロゲナーゼ

(GDH) を用いたシステムもある。

酵素電極を用いたバイオ燃料電池の難点は一般にその反応速度（電流）が大きいことである。得られる電流がマイクロアンペアレベルであることが、これまでこの種の生物燃料電池の開発の魅力を低下させてきた。最近、例えば、電極面積を大きくするために炭素布（カーボンフェルト）を用い、見かけの面積上では電流値を mA/cm^2 レベルにすることが可能であることが示されている。電池出力も、 $0.5 \sim 1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ レベルになっている。

酵素の電極上での直接電子移動反応を利用したバイオ燃料電池の開発も進められている。一般に、複数の酸化還元中心を有する酵素は、電極上での酵素分子の配向制御によって電極上での直接電子移動が生じる場合がある。フルクトースデヒドロゲナーゼ (FDH) や上記の BOD はその例として知られている。この場合、メディエータ分子の固定化が不要になるので、電極系が簡素になり、実用的には極めて好ましい。特に、生体埋め込み型のバイオ電池としての応用に有利である。

酵素電極の場合、クロス反応の心配が少ないので、逆に糖酸化極と空気還元極が隣接した微細なバイオ燃料電池への展開の可能性もある。生体埋め込み型のバイオ電池も考えられる。

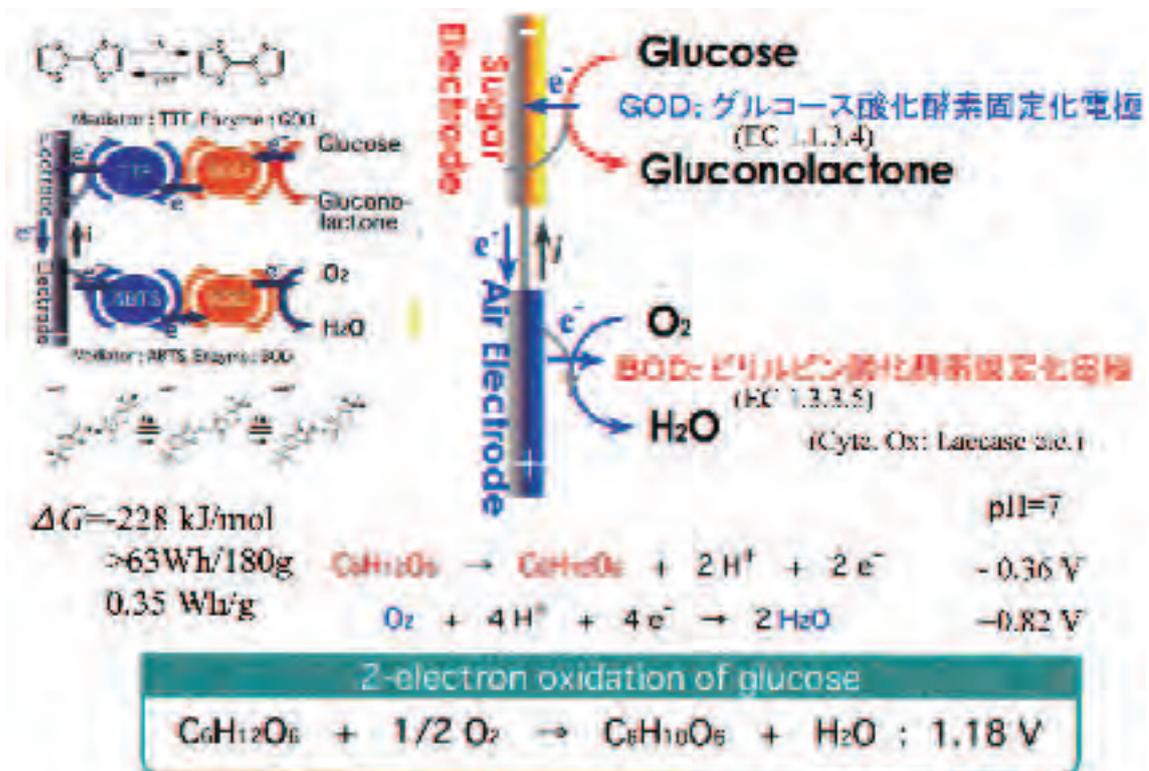


図 4.6.2 酵素／メディエータ系電極を用いたグルコース－空気電池の概念図

4.6.4 金属触媒電極を用いたバイオ燃料電池

酵素を用いることなく、例えば、金属の触媒作用を用いた酵素反応類似のグルコースの酸化や酸素の還元反応もバイオ燃料電池の可能性を拡張する上で極めて興味深い。

例えば、アルカリ溶液中で、金電極や金に銀を単原子レベル以下で担持した電極はグルコースからグルコノラクトン（グルコン酸）への酸化反応に優れた触媒作用を示す。他方の電極には、例えば、市販の亜鉛 - 空気電池用の空気極（酸素還元極）を用いて簡単なグルコース - 空気電池が作製できる。

さらに、改良型のグルコース酸化電極として、金ナノ粒子を固定化した炭素電極が利用できる。大面積化電極を用いた場合、グルコースの酸化電流は、+0.4 V 付近では容易に 4 ~ 7 mA/cm² に達する。実際、構成したバイオ燃料電池で、見かけの電極面積に対して、開回路電圧：約 0.7 ~ 0.9 V、閉回路電流：約 14 mA/cm²、最大出力（約 0.4 V において）：1.5 ~ 2.5 mW/cm² が得られている。既に、出力電圧 1.5 V 程度で 20 ~ 40 mA 程度の電流が比較的容易に得られる（図 4.6.3）。

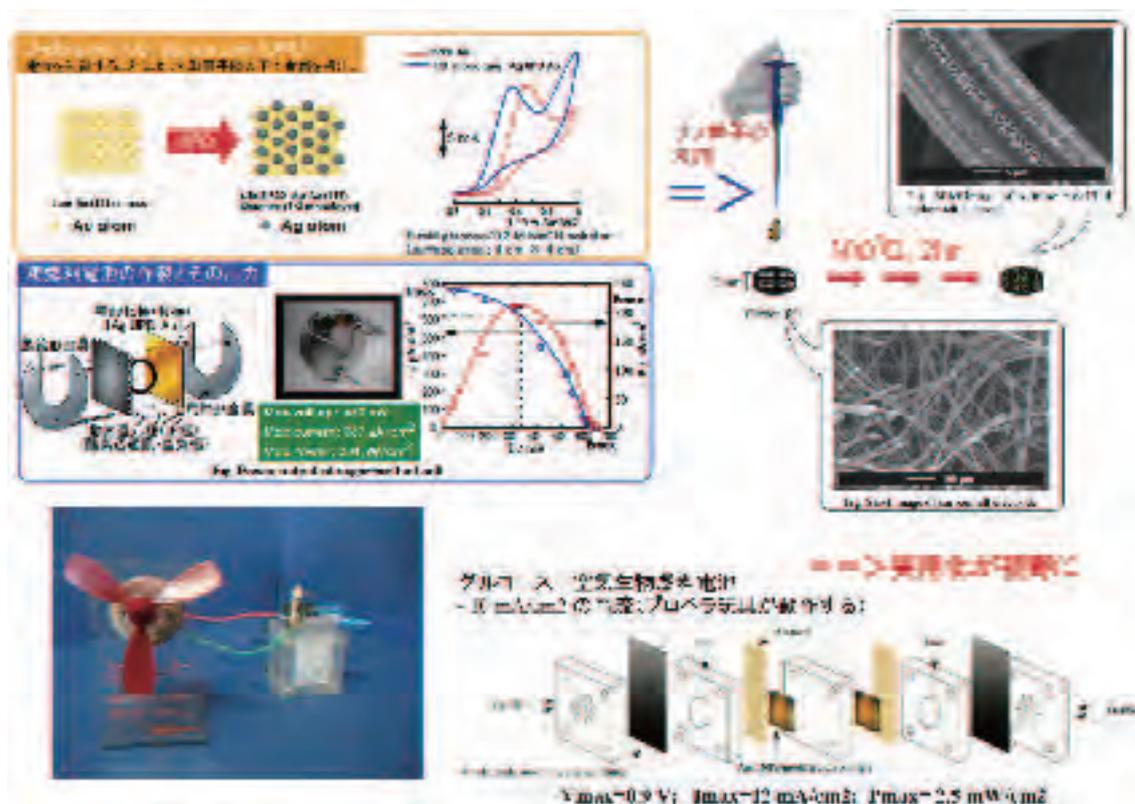


図 4.6.3 金属電極及び金ナノ粒子担持電極を用いたグルコース-空気生物燃料電池の作製

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

4.6.5 エネルギー事情・環境問題とグルコースー空気電池

今日、我が国の生物系廃棄物は、年間3億トン以上に達するといわれている。上記の(2)式によるグルコースの酸化反応のエネルギー産出量(1 Wh = 3.6 kJの関係から、63 Wh / グルコース1モル (= 180 g) (= 0.35 Wh / グルコース1 g) から、いま、国内の生物系廃棄物3億トンの中に50 %程度のグルコースがあるとすれば、1.5億トンのグルコースは、0.53億 × 10⁶ Wh (= 5.3 × 10¹¹ kWh) の潜在エネルギーを有していることになる。この潜在能力は侮れなく、家庭分散型のバイオ燃料電池設置の意義が理解できる。

4.6.6 バイオ燃料電池の課題と未来

バイオ燃料電池開発には反応場としての適切な触媒作用を有する電極系の開発(電極設計)が最も重要な課題となる。

出力特性(電流 × 起電力 = エネルギー出力)の良い燃料電池を得るためには、糖酸化極はできるだけネガティブな電位で、空気極はできるだけポジティブな電位で反応すること(電池の起電力が大きくなる)と、それぞれの電極上での酸化・還元反応の速度(電流)が大きいことが求められる。

ここで、糖の酸化極での反応が空気極での酸素還元電位よりもネガティブな電位で進行するならば、糖酸化用電極上で酸素還元反応が、また逆に酸素還元極で糖酸化反応が生じる(クロス反応)可能性がある。クロス反応を防ぐためには、それぞれの電極上での目的反応だけが生じる反応選択性を有しているか、

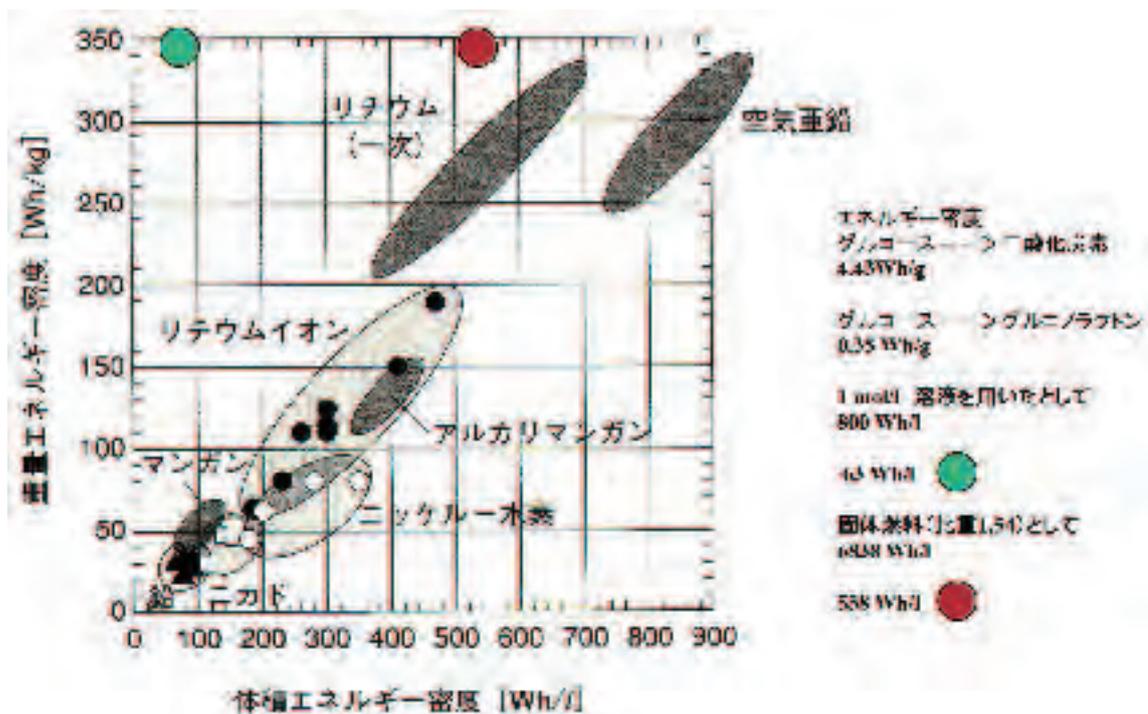


図 4.6.4 各種電池のエネルギー密度²⁾

反応物である糖と酸素が互いに混在しないことが必要である。前者には選択的な触媒機能を持つ電極の開発が、後者は電池の構造や構成に関わる技術的課題であり、その解決には適正なセパレーター材料の選定や電池の構造デザインが要求される。

表面積を増大させる工夫をした電極などを用いて、今日、出力は容易に数 mA/cm²、数 mW/cm² レベルのバイオ電池が構成され、実用への現実性も明らかになりつつある。

一方、実用化のためには、長時間動作のための改良が必要である。数時間から、長いもので、1ヶ月程度の動作が報告されているが、さらに長時間動作するバイオ電池の開発のための研究が要求される。

バイオ燃料電池は、燃料の安全性、軽量型であることから（図 4.6.4）、小型携帯用電池（例えば、充電用電池など）としての利用が考えられる。将来的には、農業廃棄物のような生物系廃棄物や家庭の生ゴミ、廃木材や廃建材、雑草など様々なバイオマス資源の利用が可能で、これらを利用した発電システムは、環境とエネルギーに優しい新技術として新しい産業の創出に繋がる大きな可能性を秘めている。この生物系廃棄物を利用したエネルギー問題への寄与は少し先としても、mW レベルの電力で動作する電子デバイスの駆動電力とし



図 4.6.5 バイオ燃料電池の将来の展開（大型から超小型まで様々なサイズの電池が可能）

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

ても十分利用できる。医療用には、安全性評価等が必要になるとはいえ、生体埋め込み型を含めて応用の可能性が出てきた。例えば、心臓のペースメーカー等の電源としても考えられる。特に、酵素電極は小型化が可能で、生体適合性にも優れていることから小型の生体埋め込み型の電池への展開も期待される。生体内にはグルコースや酸素が存在することを考えれば、バイオ燃料電池の仕組みを埋め込むことで、生体内で発電可能な電池として機能させることもあながち夢ではない。今後、バイオ燃料電池は大型から超小型まで目的に応じた幅広いサイズの電池が作製されて様々な領域で新しい応用の夢が広がるものと期待される（図 4.6.5）。

文献

- 1) 谷口 功, グルコース-空気生物燃料電池, 現代化学, 421, 22 (2006).
- 2) 谷口 功, エコインダストリー, 10 (4), 36 (2005); 化学と工業, 58 (11), 1332 (2005); バイオ燃料電池の電極設計, 「電池革新が拓く次世代電源」, エヌティーエス社, 東京, pp. 27-43 (2005); 化学工業, 58 (1), 8 (2007).
- 3) 谷口 功, グルコース-空気燃料電池(第15章), 「バイオ電気化学の実際-バイオセンサ・バイオ電池の実用展開-」, シーエムシー出版, 東京, pp. 252-270 (2007).

4.7 生体エネルギー変換素子

池田 篤治 (福井県立大学)

4.7.1 変換技術

生体エネルギー変換の概要を図 4.7.1 に示した。植物による光合成は変換効率の高い光エネルギー変換系であり、そこで生産される糖などの有機物は高エネルギー物質である。例えばブドウ糖 1 g のエネルギー容量は 3.6 Wh と単三アルカリ電池のそれ (約 3 Wh) に匹敵する。人間を含めた動物はこれらの有機物をエネルギー源として有効に利用している。そのしくみもまた変換効率の高いもので、その鍵を握っているのが高度な触媒機能を持つタンパク質、即ち酵素である。

生物エネルギー変換 (酸化リン酸化) は図 4.7.2 に示すように電子とプロトンへの電荷分離を担う酵素 E_1 と、電子とプロトンを酸素へ放出する酵素 E_4 から成る。これは水素-酸素燃料電池と同じ化学に従うものである。酵素を白金のかわりに電極触媒に出来れば、たべものを燃料とする電池、バイオ電池、ができる (ご飯などのたべものは酵素作用によってブドウ糖などへ分解できる)。

バイオ電池を実現するには酵素触媒を用いた電極、酵素触媒電極、の実用化技術が必須である。間接法と直接法の二つの様式が考えられ、前者は酵素と電極基材との間に電子伝達媒体 (メディエータ) として金属錯体や有機物を介在

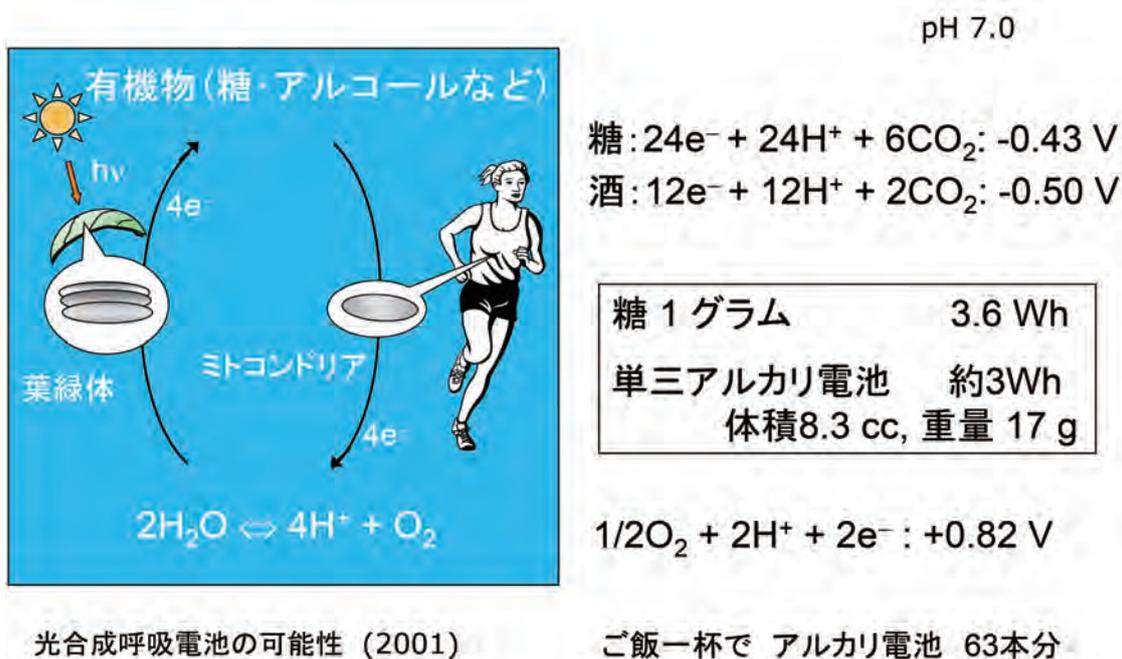


図 4.7.1 生物のエネルギー変換 (エネルギー代謝)

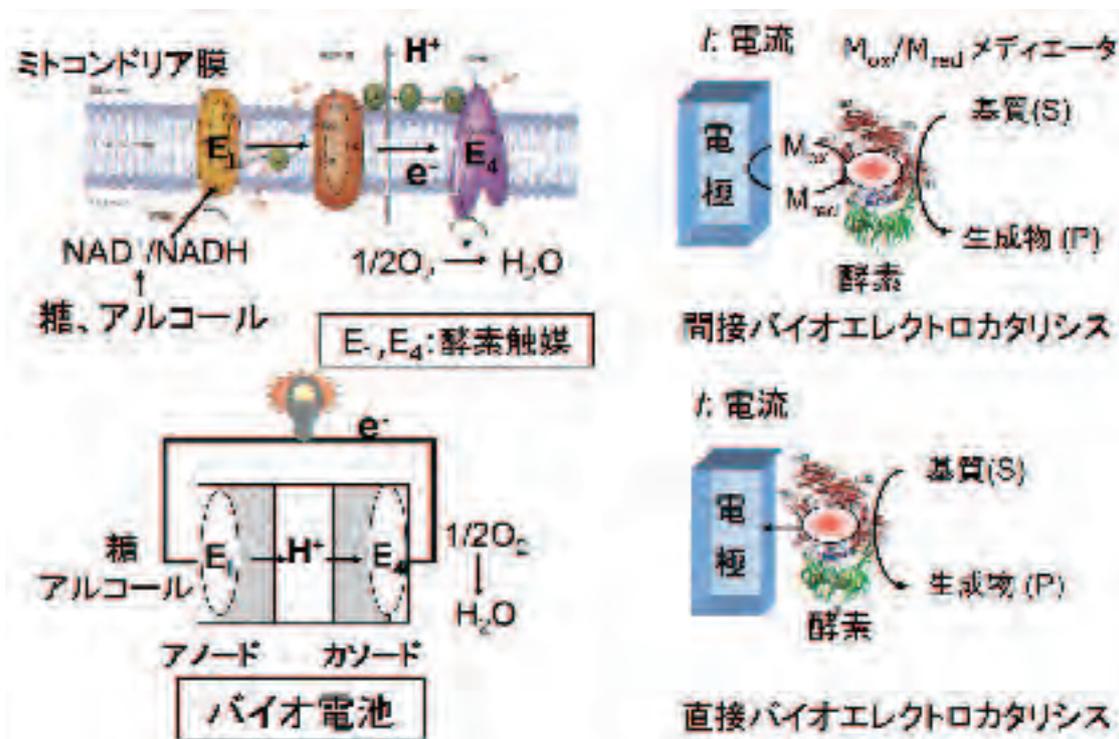


図 4.7.2 酸化的リン酸化 (ATP 合成) とバイオ電池

させるもの（間接バイオエレクトロカタリシス：MET）で、後者は酵素と電極との直接電子移動（直接バイオエレクトロカタリシス：DET）を行わせるものである。

4.7.2 理論限界と現状および将来の予想

バイオ電池のパワー密度を決める電圧と電流について：単一電池の理論電圧はブドウ糖、エタノールなど用いる燃料によって幾分異なるが、1.2～1.3 Vと、水素-酸素燃料電池と同程度である。電流密度の限界は電極への燃料供給速度で決まるが、そのためには電極の構造と酵素触媒電極反応速度の向上に関する技術開発が前提となる。

現状を具体例で示す。図 4.7.3 に現時点で世界最高出力の MET 型バイオ電池を示す。開回路電圧 0.8 V、安定発電時出力 1.5 mW/cm^2 (0.3 V、 5 mA/cm^2) で、4 cm 角の大きさで 50 mW の出力を実現している。将来、電流密度の向上によって、1 cm 角へとサイズ縮小に成功すれば、補聴器、携帯ラジオ、電子手帳などへの実用が具体化できる。

図 4.7.4 は体内（皮下）埋め込み超小型電源をめざす研究である。ブドウ糖分解、酸素還元酵素触媒をそれぞれ（高分子メディエータとともに）コーティングした径 $7 \mu\text{m}$ の炭素繊維を MET 型バイオ電池としたもので、ブドウ果実に挿入して 0.3 mW/cm^2 (0.6 V) の出力を得ている。将来、毛細血管からのブドウ糖をエネルギー源とすることができれば、血糖計などのセンサ用電源および信号送信用電源としては十分な出力である。

図 4.7.5 は DET 型バイオ電池として、その出力にブレークスルーをもたらしたごく最近の研究である。炭素フェルトに酵素をコーティングしただけの電極を 50 mL の果糖溶液に入れるだけで、開回路電圧 0.79 V、最大出力 0.85 mW/cm^2 (2 mA/cm^2) と、MET 型バイオ電池に匹敵するパワーを得ている。単分子層酵素固定平面電極について DET 型電極反応で予想されていた値を十倍以上も越える大きな電流密度を実現した意義は大変大きい。メディエータ化合物を用いない DET 型酵素触媒電極は電圧ロスが少なく、構造の簡単化が容易であり、生体エネルギー変換素子として、その将来が期待される。

4.7.3 技術の特徴

1. 砂糖、酒、飲料水など、いつでも、どこでも、だれもが日常生活で毎日消費する食べ物が燃料として利用できる。
2. そのエネルギー容量は 1 g のブドウ糖や 3 mL の日本酒で単三アルカリ電池に相当するほど大きい。従って擬一次電池として機能し、また家庭で容易に燃料再充填することもできる。
3. 軽量で安全（乳幼児用器具などの電源、使い捨て可能で環境問題を起こさ

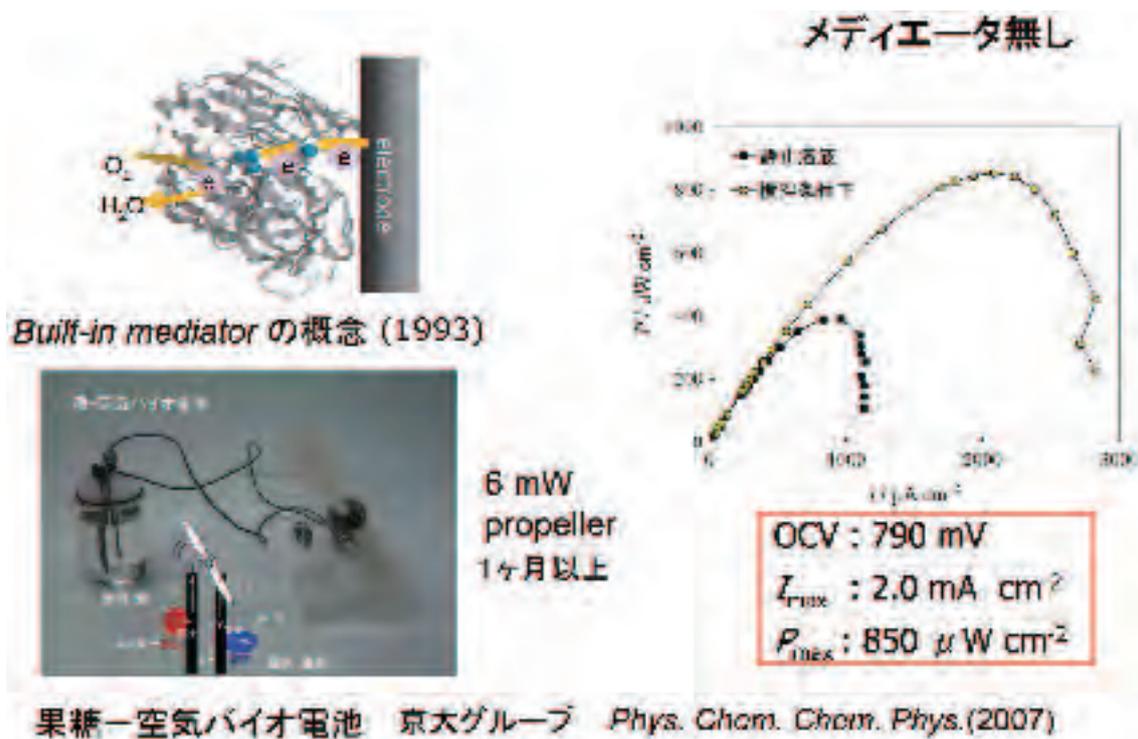


図 4.7.5 新しい展開：酵素 - 電極直接電子移動

ない)。

4. 何処までも微小化可能。その理由は、通常の電池とは構成が根本的に異なり (1) 酵素触媒は選択性が非常に高いのでアノードとカソードとの交差反応が起こらず隔膜が不要。(2) 常温常圧中性条件で作動するのでシールドケースのような保護容器が不要、(3) 炭素繊維のような微小材料に酵素触媒をコーティングしたバイオ電極 2 本で電池が構成できる (将来、ナノマシンの電源としての展開も可能)。などである。
5. 安価で供給できる。主たる材料は電極としての炭素材と触媒としての酵素でありいずれも安価に大量に手に入る (酵素は微生物培養によって必要量供給できる。洗剤などに使用されている酵素の価格を見れば、用途が広がれば酵素の価格は大幅に下がる)。

問題点としては、1. 高温や極寒といった苛酷な環境では特別な措置が必要であり、2. 電流密度の更なる向上が必要、3. 酵素の触媒寿命が短い、ことが挙げられる。特に酵素触媒の長寿命化はバイオ電池を実現するために解決しなければならぬ最大の課題である。

4.7.4 技術の説明と開発課題

本技術の要点は酵素触媒電極 (上述) の作成にあり、その高機能化 (50 mA/cm² の電流密度実現と最低 3 ヶ月以上の作動寿命の達成) が、当面の開

発課題である。ポイントは、酵素触媒分子の電極面への配向制御（図 4.7.5）と、電極材料表面の物理・化学特性制御（図 4.7.6）にある。いずれも多面的な基礎科学からのアプローチが必要で、地道な研究持続が必要である。と同時に、図 4.7.3 や図 4.7.4 に示すような用途を明確にした実用開発を半ば試行錯誤的、網羅的に進めて行く必要がある。後者の成果によって前者の課題が明確になり、前者の研究が後者の成果に科学的裏付けを与え、技術革新のしっかりした体系が出来る。バイオ電池の研究を先導している研究者が中心となって、生物電気化学、界面物理化学、材料化学、有用酵素探索（応用微生物学）や酵素改変（タンパク質工学）に関する研究者を含めた総合的な研究展開を進める必要がある。ごく最近、微生物を触媒とするバイオ電池にも関心が高まっているが、出来ればその電極触媒過程も含めた研究展開が望まれる。

4.7.5 海外状況

アメリカにおいては既に5年以上前から軍事研究予算が計上され、ベンチャー企業化含みで図 4.7.4 に述べた研究が進められている（A. Heller 教授、テキサス大）。また、若手のバイオ電池研究グループ（P. Atanacssov、ニューメキシコ大、ら6つの大学の10人）（Fundamentals and Bioengineering of Enzymatic Fuel Cells）に、昨年から5年間に350万ドルの研究費が出されている。なお、海外では、微生物を触媒とする生物燃料電池の研究も活発に進められている（B. Logan、ペンシルバニア州立大）。

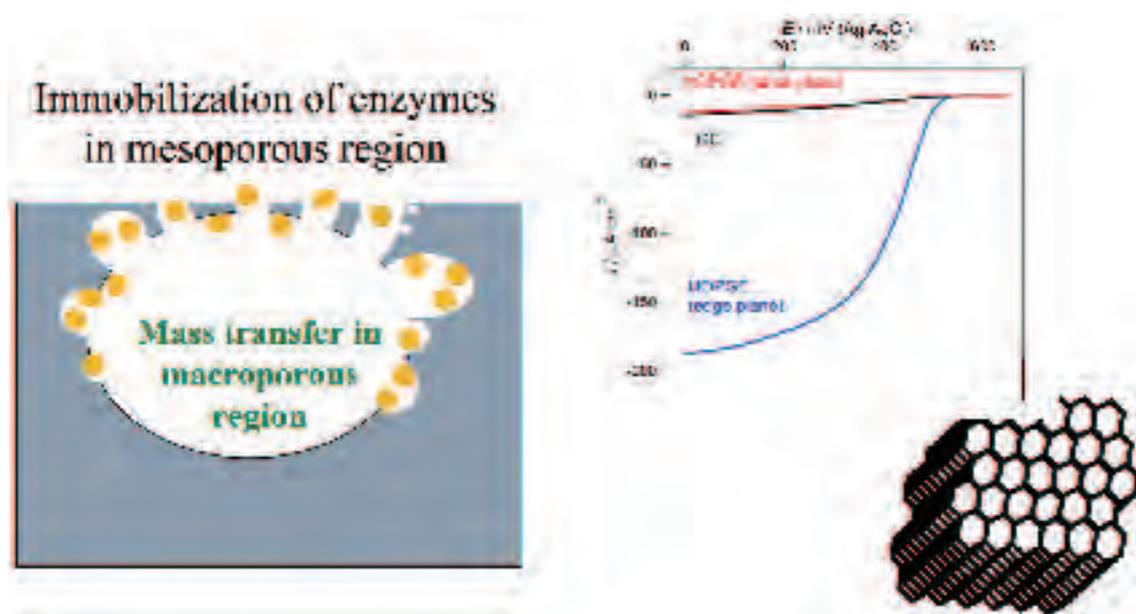


図 4.7.6 酵素触媒電極の特性と炭素電極表面の物理・化学

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

5. 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

本章では、希薄分散エネルギー活用技術に対して需要側の視点から応用例と課題を述べる。

5.1 電子機器側での対応事例

齊藤 豊 (タキオン)

図 5.1.1 に示すセイコーサーミックは人体と周囲の温度差で発電・動作する世界初の熱電発電腕時計である。1998年、セイコーウオッチ株式会社より発売されたものである。発電は BiTe 素子を用いたゼーベック効果を利用したものであり、素子の原理的詳細は本報告書「熱電素子を用いた微小温度差発電」の項を参照されたい。



図 5.1.1 熱電発電腕時計

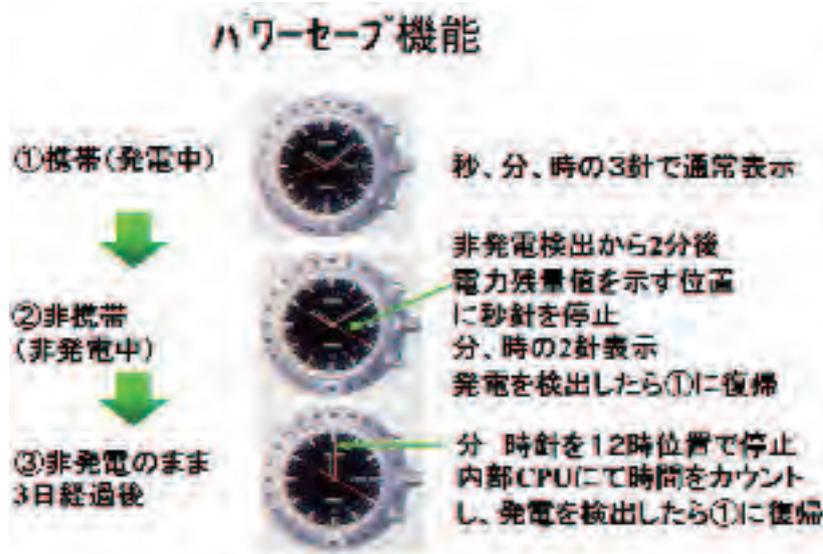


図 5.1.2 時計システム側でのパワーセーブ動作制御

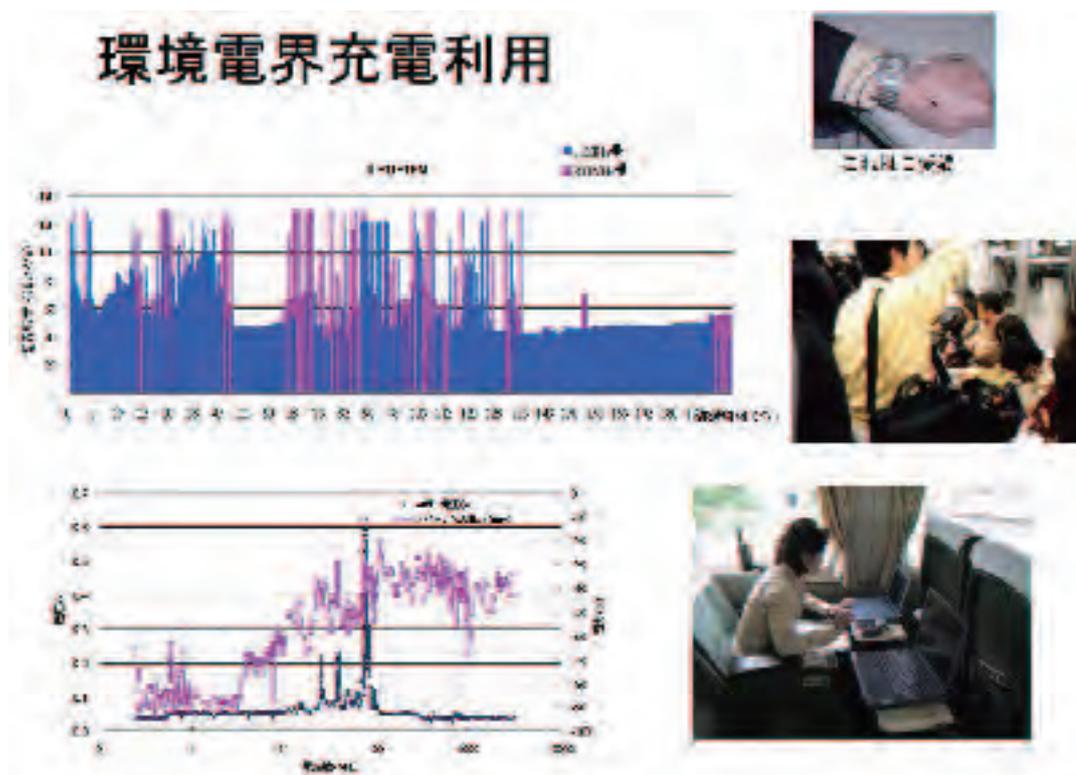


図 5.1.3 環境電界の測定・調査

人体表面の温度と熱発電素子の低温側の温度差は装着当初が最も大きい。それでもゼーベック素子モジュールが発電するのはたったの 0.6 V で、ほどなく 0.2 ~ 0.3 V 程度で飽和する。その電圧でも専用に開発した超低電圧動作 CMOS 制御 IC は整流、発振、チャージポンプ昇圧の機能を果たし、2 次電池への充電と時計回路の動作を達成している。実は、腕時計はあまり認識されていないが、その消費電力は驚異的に少なく、アナログクォーツで 2 ~ 3 μW 、多機能デジタルでも ~ 10 μW である。したがって、平均 10 μW の発電があれば充分黒字となる。人体・熱発電は本ワークショップでのテーマである、“希薄分散エネルギー活用技術”の実用化例のひとつと言える。図 5.1.2 では、時計システム側でのパワーセーブ動作制御を紹介する。

すなわち、エネルギー（温度差）がない時は複数段階のスリープ動作などを駆使するというものである。当時はまだなかったが電波修正機能を付加すれば、現在であれば、周囲エネルギー回復→ウエイクアップ、と同時に自動時刻合せができ完全に自己完結した機器と成りえる。

希薄分散エネルギー活用技術において、電子機器側での対応ということで、ここでは、例えば、

- ・エネルギーソースがない時はもう動かなくて良いというシステム構成の割り切りも必要。

ということが提言できると考える。

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

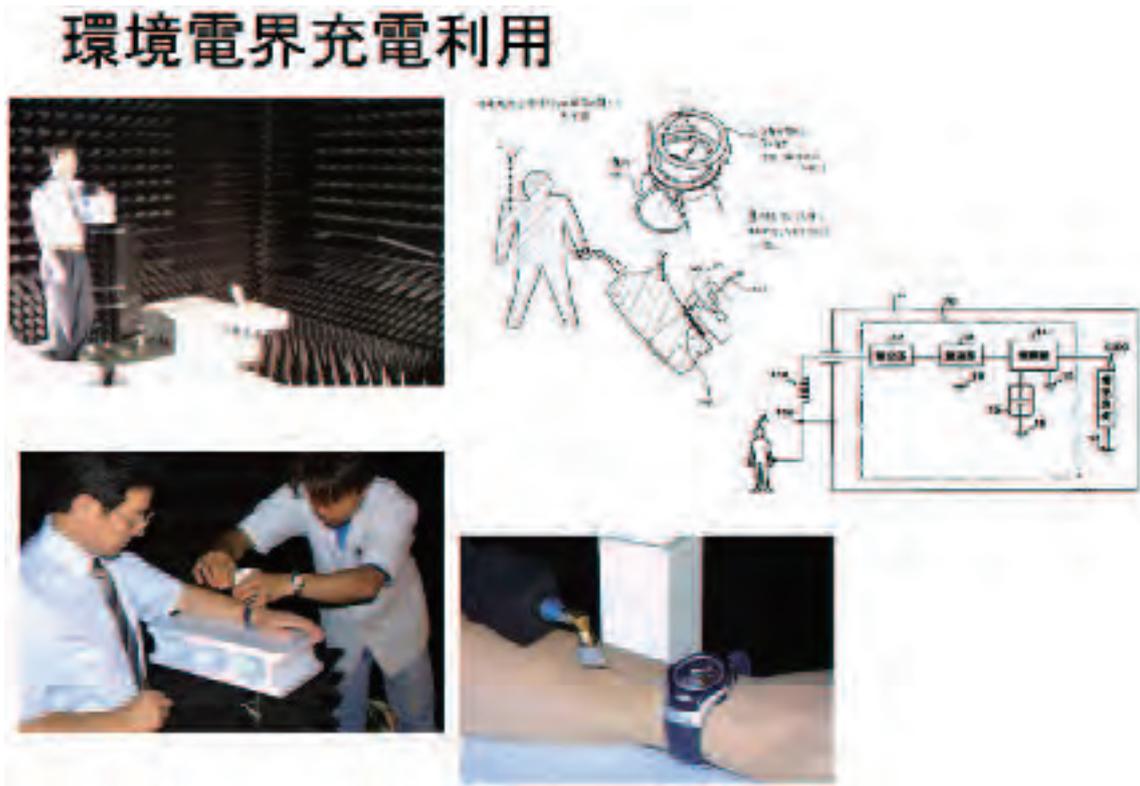


図 5.1.4 環境電界の測定・調査（低周波側）

その代わりに、この希薄分散エネルギー活用機器である熱発電時計は電源コンセントや電池屋さんがない砂漠や山間部でも確実に動作させられるタフな側面も持つものである。

腕時計としては、環境電界を利用しようという構想も試みた。近年、携帯電話の普及に伴い、人体を取り囲む電波・電界（特には高周波）が急激に増加していると考え、2000年頃より、図 5.1.3 に示すような測定・調査を行った。

専用の測定ロガーを開発した。バッグに入れて。かなりの場所と時間を徘徊して調査した。山の手線1周とか。当時は 1.5 GHz、800 MHz 帯にフォーカスした。都市部では、軒並み 100 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ を超える状況が見られた。仮に平均して空間電界が 100 dB $\mu\text{V}/\text{m}$ を期待できるとすると、

- ・ 0 dB アンテナで受けた場合→約 200 μW
- ・ -10 dB アンテナで受けた場合→約 19 μW

が得られると目論んだが、現在主流が PDC 方式から CDMA (3G) 方式へと切り変わっているため、エネルギー収穫的にはかなり困難な状況になっていると考えられる。

なお、熱発電時計用に開発した低電圧 CMOS 昇圧・充電 IC 技術をマイクロ波に応用しようという試みも行った。入力をゼーベック素子でなくレクテナ出力に接続するだけで、充分時計を動作させることが可能であった。2003年、

京都大学・松本先生、篠原先生のご指導も受けて再開発試作したものである。TSMC 0.35 低電圧 CMOS プロセス使用で IC を再製作。京都大学 30 dB 弱電界エネルギー空間ルームで動作達成した。“希薄分散エネルギー活用技術”においてはこれは応用展開のひとつである「積極給電」の MATER になるわけだが。

なお、この関連では、図 5.1.4 に示すように、低周波側の電界の挙動も調べたが、室内、蛍光灯使用環境、PC のディスプレイの正面、これらも腕時計を動作させるぐらいは充分収穫できる可能性があることが判った。ここでは人体に接続されていることがポイントでもあることが判った。ある意味、時計体自体が空中線とすると、人体は GND として作用しているとも言える。原理動作的には、体に接触ないし密接して保持していることが成立要件なのかも知れない。

振り返って、実は腕時計は早期より希薄分散エネルギーを活用してきたと考えられる。

自動巻き時計：運動エネルギーを利用するという観点から、希薄分散エネルギー利用のルーツと言えるかも知れない。原点は 19 世紀まで遡ることになるが・・・

ソーラ：(現在、かなり主流)、
そして、上述した(この間、自動巻き発電：セイコーキネティックなども登場した)、

熱発電時計：(その後、製造は途絶えているが)あるいは次は環境電界利用なのか・・・?

そこで、改めて、自動巻きの登場となる。近年セイコーより発売の「スプリングドライブ」と称している技術である。時計自体のカテゴリーとしては高級メカ時計なので、あまり認知されていないようであるが、図 5.1.5 に概要を示す。

手巻きないし自動巻きにて力を入力→貯エネルギー(ぜんまい)→解放→再変換(発電)→負荷で消費(時計回路部駆動)というものであり、特徴的には、调速機構にて→ぜんまいの解放制御→負荷変動対応・スリープ対応・・・という凝った制御を行うものである。ポイントのひとつは貯エネルギーが従前のキネティックなどが 2 次電池に蓄電していたのに対して、ぜんまい(香箱)に蓄える点である。およそ 8 mmφ、0.5 mmt という小ささで、コンマ数 mAh 程度蓄えると考えられる(後述の携帯音楽プレーヤ用では少なくともあと一桁上げたいが)。

そこで、図 5.1.6 に腕時計での対応をまとめる。“希薄分散エネルギー活用技術”の観点からすると、腕時計という機器での利用は「先取りしすぎていた?」と言えるのかもしれない。ひとつには、他の電子機器とは異なり、かなり早期

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

腕時計は早期より分散エネルギーを利用

自動巻き再来

自動巻きの手巻式多層巻戻機構の発展。その原理を高度なマイクロ部品製作による、



図 5.1.5 自動巻き再来

“集める、貯める、送る、使う” 時計は先を行きすぎていた？”

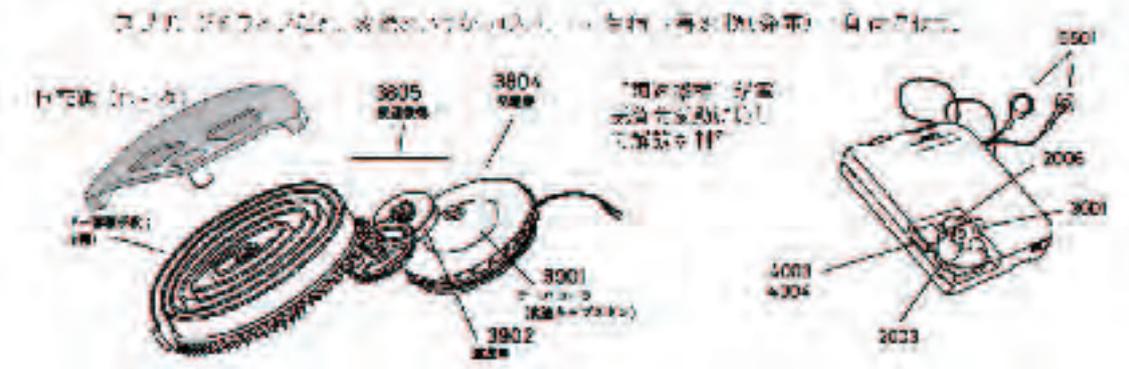


図 5.1.6 腕時計における希薄分散エネルギー利用

から超低消費を実現したことが要因として挙げられる。80年代にはAQで1～2 μW、多機能のDQでも～10 μWを既に達成。CMOSの登場の恩恵を存分に浴したと言える。CMOS-ICであることはまたシステム側（スリープ機能等）での対応も種々可能としたと言える。

進化した自動巻き再来としたが、貯めるという意味合いでは前述のぜんまいにも注目すべきであろう。ぜんまいは、2次電池と違い自然放電がゼロと言える。それと緊急時には手巻きで対応できる点が挙げられる。この技術の応用では95年ごろ、携帯音楽プレーヤ機器（例：ウォークマン）での適用を検討したこともある（当時の水準では、ぎりぎり消費電力的に解がなかったが）。不意の電池切れをユーザはとってもしやがるとのことであった。近年の固体メモリデバイス型（例：i-Podなど）では、消費電力的数値として、そろそろ実現の範囲に入ってきていると考えられる。

そこで、本項での筆者の報告のまとめであるが、

・腕時計における“希薄分散エネルギー活用技術”という概念は、先駆的利用の好例と言えるだろう。人体を接点（携帯機器、ウェアラブル機器・・・）として周辺環境とのポテンシャル差をエネルギーとして取り出して利用（温度差、力、周辺電界）するという形ではあるが。また、本項では腕時計に限って言えば、他の機器に比べてある意味先取りしすぎていたのかもしれないとしたが、近年、集積回路の革新的低消費電力化の進展で、他の携帯電子機器（携帯音楽プレーヤ、ゲーム機、積極給電を前提にすれば携帯電話等も含まれてくる）もいよいよ視野に入って来ており、技術分野（範疇）として括る意義は高く、大いに開拓するべきと考える。

そこで、この範疇での萌芽的技術の開発へ向けては、本項に限った具体論としては、例えば

・デバイス、システムでの準備として

環境電界においては、やはり変換部（SOIデバイスとか）の研究

運動エネルギーにおいては、変換部（振り子・ロータ→MEMS応用で超小型化、低イナーシャ化とか）と、貯蔵部（MEMS応用の力蓄積→進歩したぜんまい？Siは単結晶で完全弾性体。金属疲労もない。）、再変換：発電やはりMEMSでのアプローチか・・・。

などが研究のコアの一部であろう、また、

・システム構成・新規概念の準備として

例えば電子ペーパー、もう電池は持たない。エネルギーソースがない時は動かななくて良いとか・・・。携帯音楽プレーヤなどでは緊急時は手巻き入力可能とするなどの、システム構成での割り切り。

などの新しい（ある意味大胆な）機器仕様の提言を含めた形での研究推進が必要と考えるものである。

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

5.2 バッテリーレスシステムのセンサネットワークへの応用

道関 隆国 (立命館大学)

今後のエレクトロニクスの活躍が期待できる分野にユビキタスエレクトロニクスがある。巨大な数のセンサ群を人、物、環境中に配置し、各種の情報をセンシングするユビキタスサービスは、今後の我々の生活の安全・安心を補償する有用な手段になる。ユビキタスエレクトロニクスで解決すべき重要な問題の1つに電源の問題がある。多数に撒かれた端末の電池交換ができなくなってしまうためである。端末のエネルギー源として、我々の身の回りに存在する光、熱、運動といった自然エネルギー源を利用することができれば、電池交換の不要なバッテリーレス端末が実現できる。

バッテリーレス端末を設計する場合、自然エネルギー源はシステムが消費するエネルギーに比べて極めて微小であり、かつ電池と違って出力電圧が変動することを認識すべきである。このため、既存のシステムの電源を自然エネルギー源で置き換えようとする発想では用途が非常に限られたものになってしまう。このため、バッテリーレス端末の開発には、エネルギーの発生、変換、消費といった3つの観点から(図5.2.1参照)、各技術の開発を進め、3つの技術のバランスのとれた新しいアプリケーションを創出すべきである。各種既存端末の消費電力と端末サイズの関係を図5.2.2に示す。自然エネルギー源(屋内光による太陽電池発電)による発電電力とサイズの関係も図5.2.2に重ねて示した。時計の消費電力は約 $10\ \mu\text{W}$ で、時計と同一サイズの太陽電池での発電電力は時計の消費電力を2桁以上、上回るため、すでに太陽電池駆動の時計は実用化されている。一方、携帯電話の消費電力は約 $1\ \text{W}$ であり、同一サイズの太陽電池での発電電力は2桁以下である。このため、携帯電話の電力と同一の

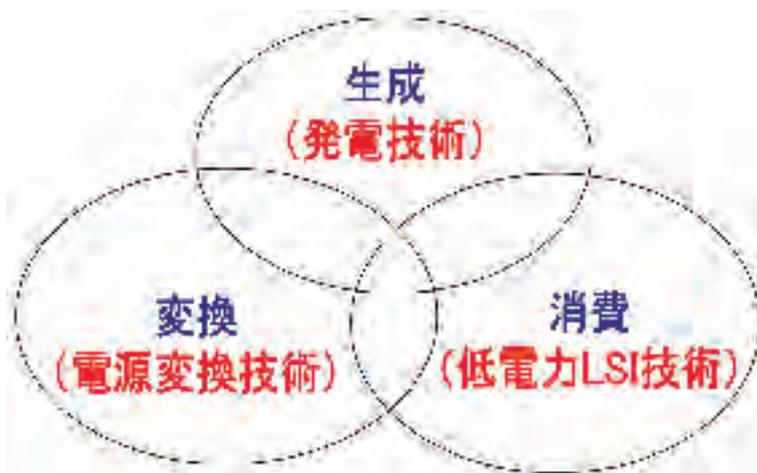


図 5.2.1 エネルギーの観点からみたバッテリーレスシステムの3つの設計ポイント

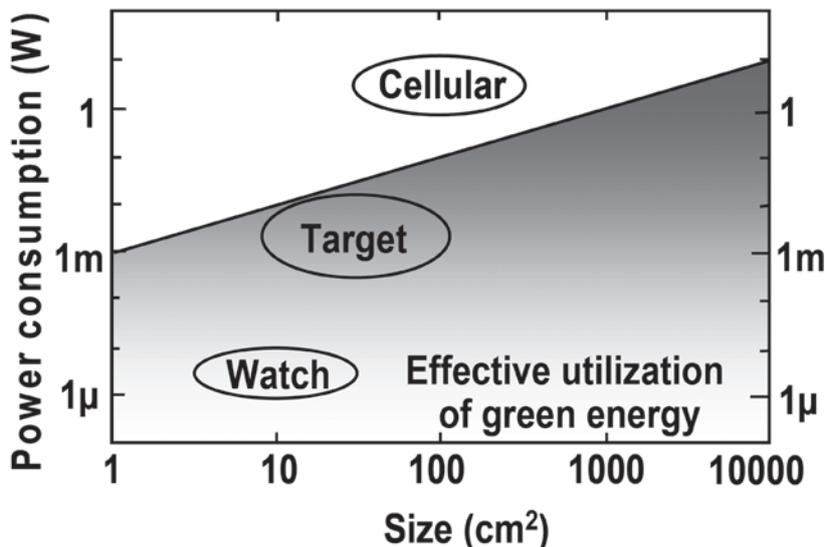


図 5.2.2 端末の消費電力と発電電力

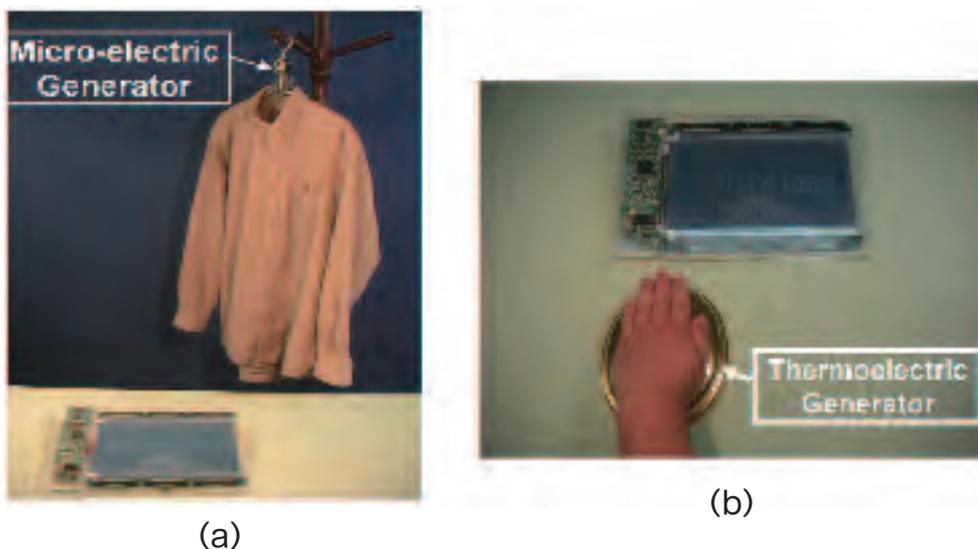


図 5.2.3 バッテリーレスシステム (a) ハンガー型センサ (b) タッチセンサ

発電電力を得るためには、太陽電池のサイズを1万平方 cm (畳一畳) 以上にする必要があり、巨大な太陽電池を持った携帯電話は、もはやモバイルとは言い難くなる。自然エネルギー源で動作可能な端末を作るためには、消費電力が1 mW 級の端末の開発が必要である。

以下では、バッテリーレスシステムをセンサネットワークに適用した応用例をもとに、エネルギーの発生、変換、消費といった3つの主要技術を解説する。センサネットワーク用バッテリーレスシステムを図 5.2.3 に示す。端末にはセンサネットワークに必須な近距離無線機能を有している。送信機は、ハンガーとタッチセンサである。両者とも端末に何回アクセスしたかが電池なしで無線

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

を介して知ることができる。まず、前者の発電源としては、服の重みで発電するマイクロ発電機であり、後者は体温と室温との温度差による温度差発電である。いずれの場合も 1 mW の電力を約 3 秒間発電している。受信機はディスプレイであり、発電源は太陽電池である。本ディスプレイでは、ディスプレイ部を透明液晶とし、太陽電池と重ねることでディスプレイ部の小面積化を図った。

次に電源変換回路技術を述べる。体温発電にもちいた熱電素子の出力特性を図 5.2.4 に示す。電池と異なり出力電圧が大きく変動することが分かる。このため、このエネルギー源を直接内部 LSI の電源に印加すると短時間しか動作しなくなる。このため、自然エネルギー端末では、内部 LSI に一定の電圧を供給する電源変換技術が必須となる。電源変換回路の 1 例を図 5.2.5 に示す。

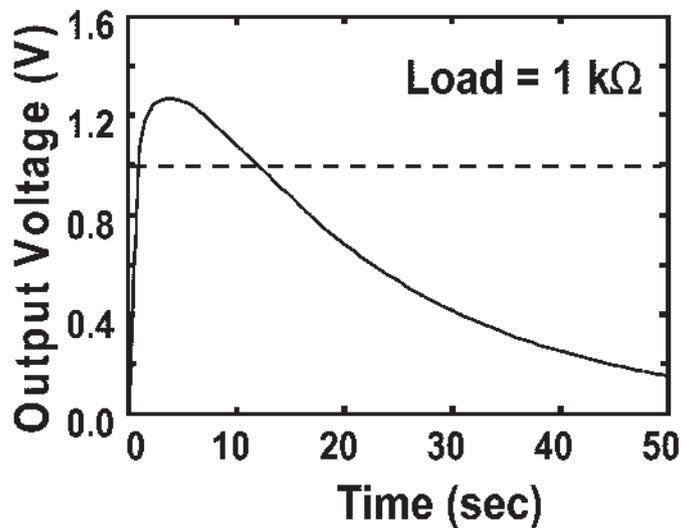


図 5.2.4 熱電素子の出力特性

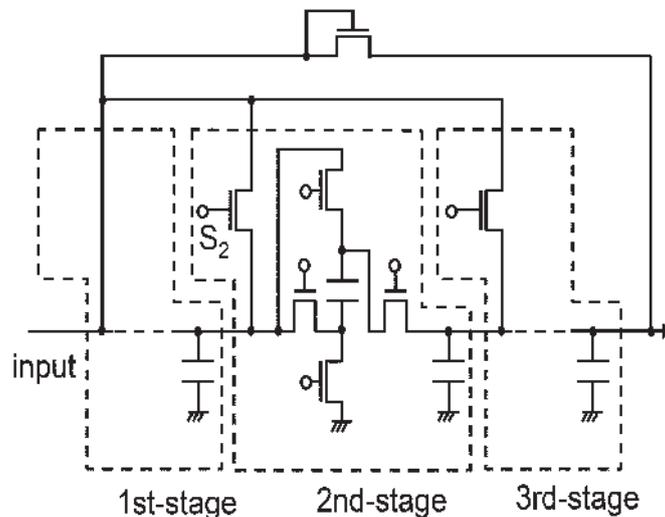


図 5.2.5 可変段数型電源変換回路

スイッチトキャパシタ型の電源変換回路を多段接続し、エネルギー源の出力電圧に応じて昇圧段数を可変にすることにより、電源変換回路の出力電圧を長時間一定にできる（図 5.2.6 参照）。最後に極低電力回路技術を述べる。LSI の電力は電源電圧の 2 乗に比例して低減するため、LSI の低電力化のためには電源電圧を低下させることが最も効果的である。動作速度を一定とした場合に LSI の電源電圧を低下させた場合のエネルギーを図 5.2.7 に示す。LSI の電源電圧を低下しすぎると LSI を構成する MOSFET のしきい値電圧も下げざるを得なくなり、しきい値電圧の低下による MOSFET のリーク電流が指数関数で増加するためである。リーク電流の削減には SOI デバイスが有効である。また、回路技術としては、LSI の動作時には回路を低しきい値トランジスタで動作させ、非動作時には高しきい値のトランジスタで低しきい値回路のリーク電流を削減する MTCMOS/SOI 回路が有効である（図 5.2.8 参照）。MTCMOS/SOI 回路を用い、電源電圧が 0.5 ~ 1 V で動作する端末のブロック構成を図 5.2.9 に纏める。

本バッテリーレスシステムの開発を通して得られた指針を示す。まず、第 1 は、ユビキタスエレクトロニクスに適したマイクロエネルギー源の研究開発を重点化すべきである。燃料電池に代表される新エネルギー源の研究開発が勢力的に行われているが、これらの用途は、自動車や携帯電話といったユビキタス端末に比べて体積の大きい用途であり、サイズの大きいエネルギー源で、高エネルギー化・高出力化が行われている。ユビキタス端末のようにサイズの小さい機器を対象にする場合には、小型薄型化・長寿命化を主としたマイクロエネルギー源の研究開発を進めるべきである（図 5.2.10 参照）。特に、我々の身の回りに存在する光、熱、運動（振動）エネルギーといった自然エネルギーを積極的に活用することが重要である。第 2 には、エネルギー源単体の研究開発だけではなく、エネルギーの発生（発電）、変換（電源変換回路）、消費（極低電力 LSI）という総合的な観点から見たシステム設計が重要である。特に、自然エネルギーを活用したバッテリーレス端末に代表される極低電力システムは、上記の 3 つの要素が絡み合い、そのバランスで設計されるからである。以下に各要素技術の課題を纏める。発電技術では、従来型の電池の小型化に加えて各種のマイクロエネルギー源の探索が必要。特に、自然エネルギー源、無線給電、生体発電等の新化学エネルギー源の探索は重要。電源変換技術では、従来の電池に比べて、常に変動する自然エネルギー源に対して、一定の電圧を内部 LSI に長時間供給できる電源変換技術が重要。極低電力 LSI 技術としては、システムを構成する個別の回路ブロックの低電力化に加えて、アクティブな動作時間を極限まで削減する超間欠動作等、システムレベルの低電力化技術が重要である。

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

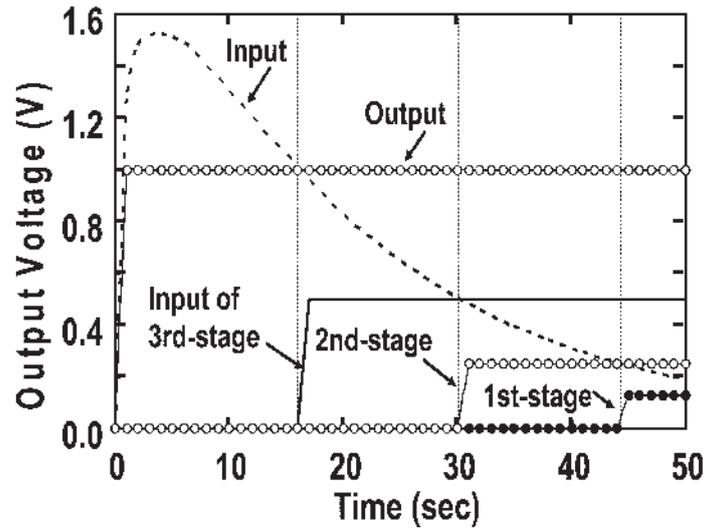


図 5.2.6 電源変換回路の出力特性

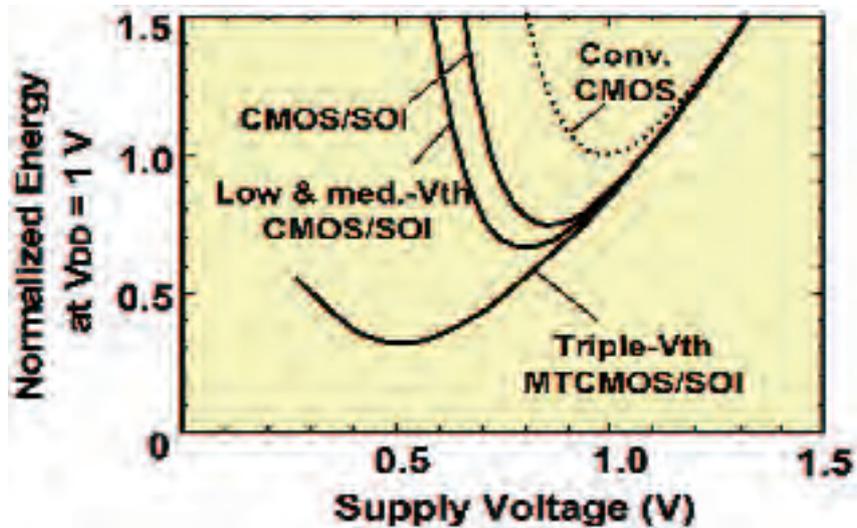


図 5.2.7 CMOS 回路の消費エネルギーの電源電圧依存性

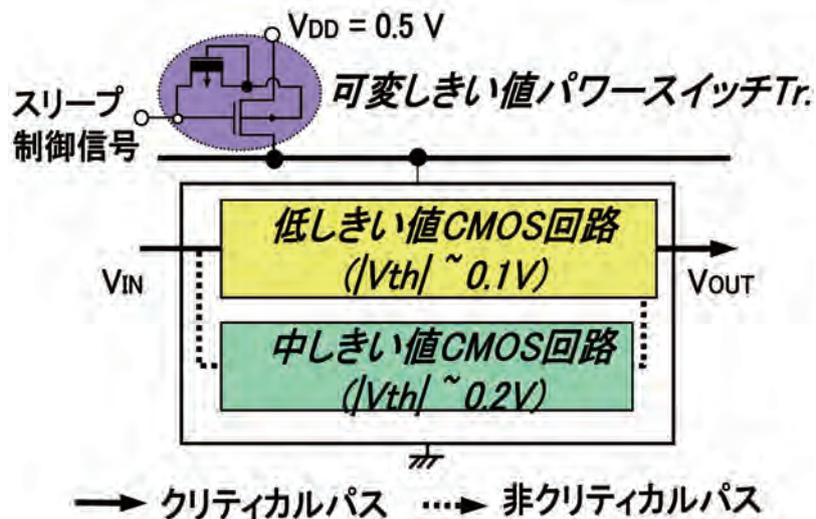


図 5.2.8 0.5 V 動作 MTCMOS/SOI 回路構成

以下に希薄分散エネルギー活用技術を展開していくための提言を纏める。

提言1：マイクロエネルギー源の研究開発を重点化すべきである。

提言2：エネルギー源単体の研究開発だけではなく、エネルギーの発生、変換、消費といった3つの観点から総合的にみたシステム開発が重要。

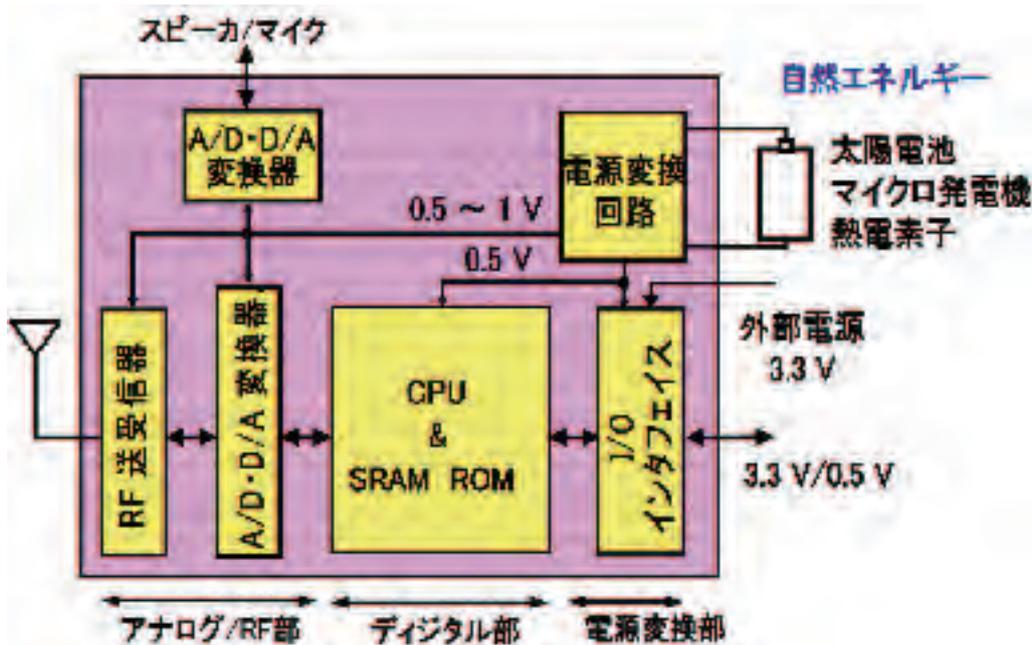


図 5.2.9 0.5-1 V 動作極低電圧回路ブロック

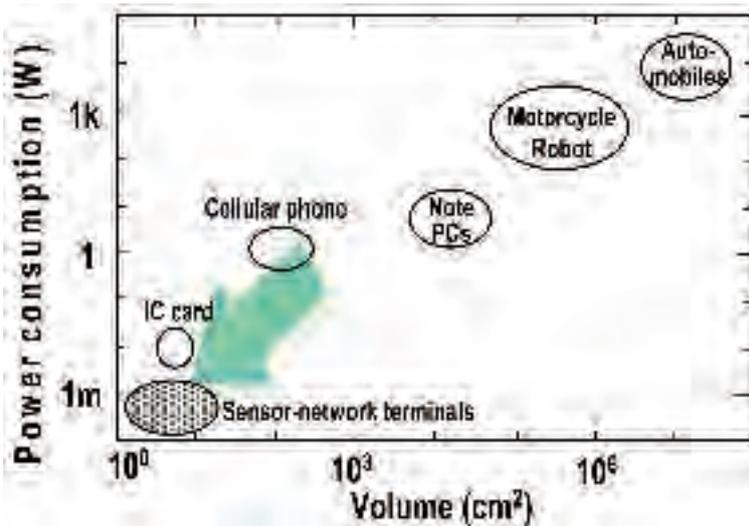


図 5.2.10 ユビキタスエネルギー源のターゲット

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

5.3 自動車の排出エネルギー活用への期待 斎藤 昭則（豊田中研）

5.3.1 自動車周りの希薄分散エネルギー

5.3.1.1 自動車からの排熱

一般のガソリンエンジン車では走行に用いられるエネルギーは投入した燃料の持つエネルギーの20～30%であり、大部分が排熱となって捨てられている。図5.3.1は燃料の持つエネルギーの消費配分を示すもので、排気からの排熱割合が約30%、ラジエーターからの排熱割合が約30%である。そのため、エンジンの熱効率向上、および高熱効率領域の使用を図るための技術開発が進められている。さらに、排気およびラジエーターからの排熱を有効に利用しようという試みがなされている。

5.3.1.2 車両周りの希薄エネルギー

走行中および駐車中の車両には太陽光が注いでいる場合が多いので、車両に太陽電池を設置して電力を得る試みがなされている。また、走行中の車両の振動を電気変換して電力を得る考えもある。

5.3.2 車両走行燃費向上のための技術開発

5.3.2.1 エンジンの熱効率向上

自動車では燃料の持つエネルギーを最大限走行に使うための技術開発がなされてきた。最も大きな課題はエンジンの熱効率向上である。通常ガソリン（火花点火）エンジンの最高熱効率は32～34%程度であるが、高圧縮比化、希薄燃焼化、摩擦損失低減が図られ、36～38%程度まで改善されている。ディー

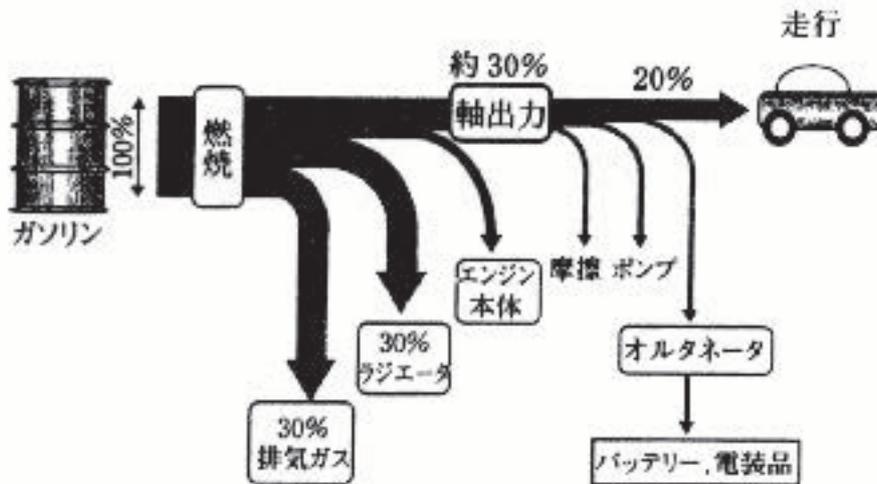


図 5.3.1 自動車で消費されるエネルギーの配分

【出典】「自動車排気熱発電—ゼーベック素子を用いた熱電発電技術の応用」

篠原, 小林, 櫛引, 古谷 (日産自動車), 自動車技術 Vol.52, No.7, 1998, P.78～82

セルエンジンでは 40 %程度の熱効率になっている。

5.3.2.2 高熱効率領域の使用とエネルギー回生

エンジンの熱効率向上に加えて、できるだけエンジンの高熱効率領域を使い、走行のためのエネルギー効率を高める技術開発も行われてきた。図 5.3.2 に車両走行状態とエンジンの作動領域を示す。この図に示されるように、エンジンの熱効率の高い領域は中速・高負荷の領域である。現状の歯車を用いた変速機では変速段の制限から熱効率の低い領域を使わざるを得ない。これに対して、無段変速機（Continuously Variable Transmission : CVT）を用いて高熱効率領域での使用頻度を高め、車両燃費の向上を図る技術開発が進められている。

一方、エンジンとモータを使ったハイブリッドシステムが実用化され、走行燃費が飛躍的に高められた。図 5.3.3 にハイブリッド車の CO₂ 低減に寄与する技術要素の効果割合を示す。CO₂ 低減、すなわち燃費改善に対する技術要

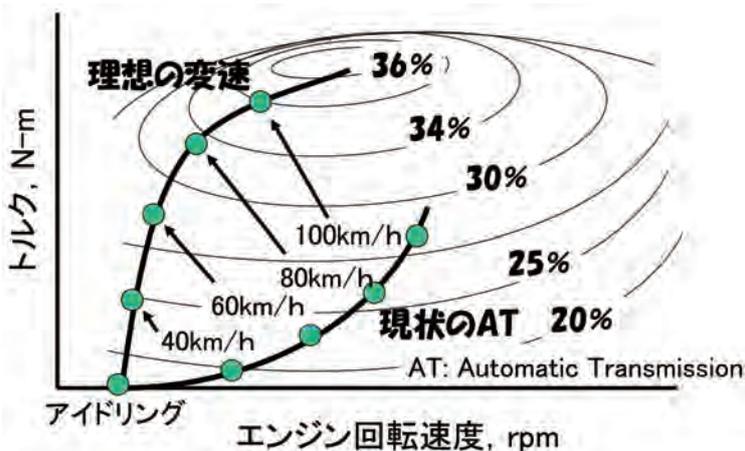


図 5.3.2 車両走行状態とエンジンの熱効率

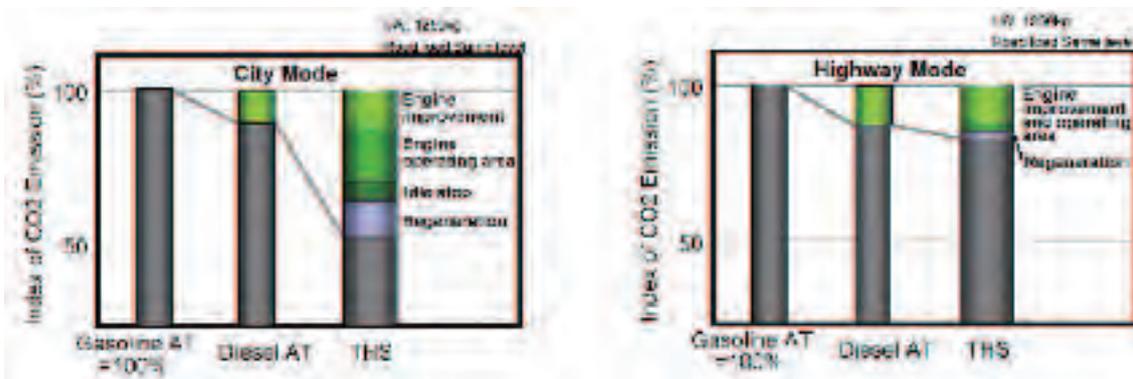


図 5.3.3 ハイブリッド車の燃費向上に対する要因の寄与割合

【出典】「Toyota's Challenge for Sustainable Mobility」Takimoto (Toyota Motor), 26.Internationales Wiener Motorensymposium 28.-29. April 2005

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

素は、エンジン改良、エンジン作動領域適正化、アイドリング停止、停止エネルギー回生に分けられる。この中で、最も改善効果が大きいエンジン作動領域適正化は、エンジンの熱効率の低い領域をモータで走行し、高熱効率領域でのみエンジンを作動させるものである。次に効果が大きいものは、モータ・ジェネレータを付加して車両停止時のエネルギーを回収し、車載二次電池に蓄えて発進・加速時のモータ駆動のための電力に使用するエネルギー回生である。このエネルギー回生は、捨てられるエネルギーの活用とみなすことができる。ただし、ハイブリッドシステムは従来のエンジンに加えて、モータ・ジェネレータ、二次電池、さらにそれらの制御装置が必要であり、コストが高くなるとともに車両重量と設置容積の増加を招く。エネルギーを有効利用することによる価値と付加装置のコストや要求容積とのバランスが課題である。

5.3.3 パワートレーンからの排熱の活用

5.3.3.1 パワートレーンからの排熱の状態

排気とラジエーターからの排熱割合がそれぞれ 30 %程度になることを述べたが、それらの熱源としての質を図 5.3.4 に示す。排気からの熱は温度範囲が 50 ~ 700 °C、熱量は 10 ~ 100 kW 程度になる。ラジエーターからの排熱は、温度がほぼ一定の 120 °C、熱量は排気と同等である。なお、エンジン本体やオイル、トランスミッションからの排熱は温度範囲 80 ~ 100 °C 程度、熱量は 1 kW 程度である。排気からの熱は質が高いと言えるが、排気管の各部でかなり温度に差がある。概略値を示すと図 5.3.5 のようである。ラジエーターからの排熱は温度が低いが一固定であり使いやすいと考えられる。

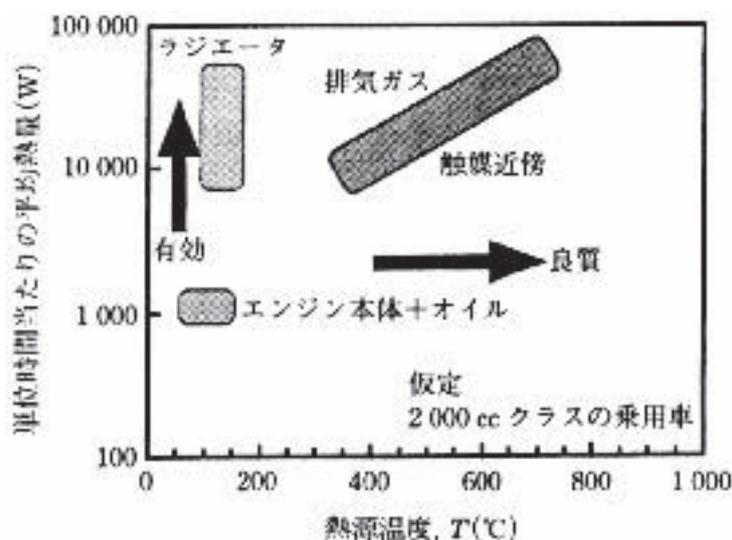


図 5.3.4 エンジン排熱の温度と熱量

【出典】「自動車排気熱発電—ゼーベック素子を用いた熱電発電技術の応用」篠原，小林，櫛引，古谷（日産自動車），自動車技術 Vol.52, No.7,1998, P.78 ~ 82

5.3.3.2 エンジン排熱回収技術

(1) 排気タービンによる回収

排気系にターボチャージャーを設置して吸入空気量を増加し、エンジントルクを上げて出力向上を図っているが、これも排熱回収の一種と考えられる。排気タービンで発電機を駆動する方法もある。

(2) ランキン・サイクルによる回収

ランキン・サイクル（蒸気機関）によって排熱を回収し、エンジン出力に直接付加して車両駆動力とする。あるいは、発電機を回して電力に変換することも考えられる。熱交換器を工夫して排気およびラジエーターからの排熱の両者を

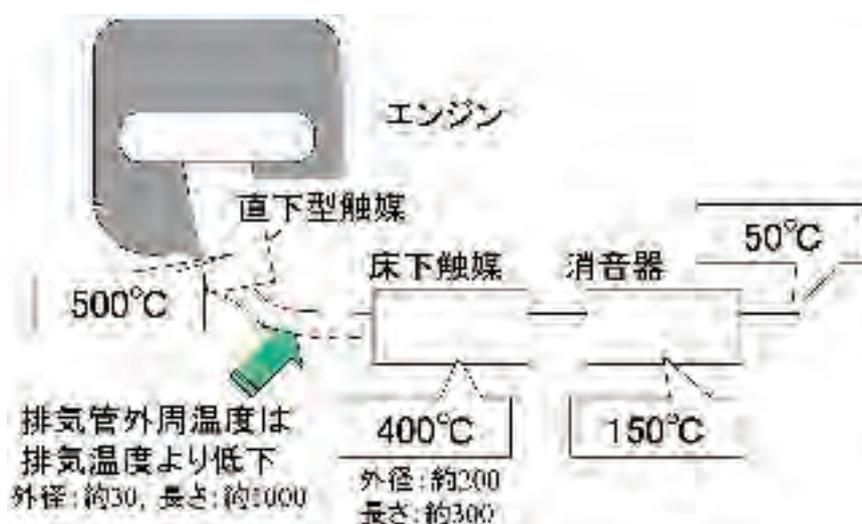


図 5.3.5 エンジン排気系での排出ガスの温度

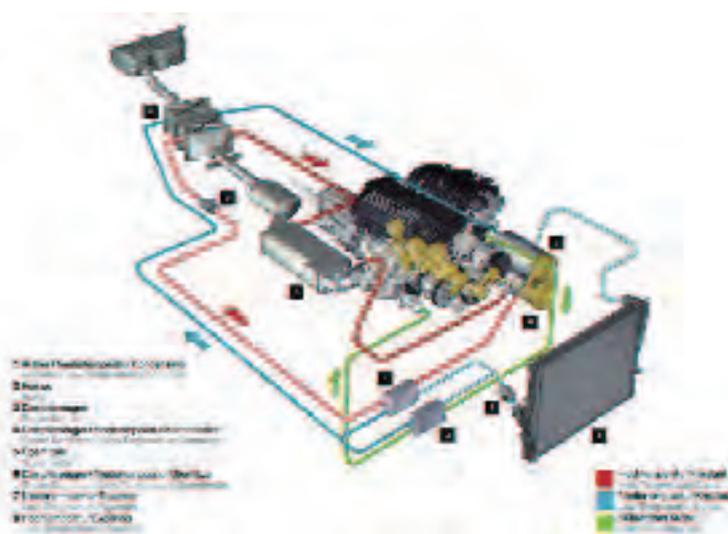


図 5.3.6 ランキンサイクルを用いた排熱回収システム

【出典】「BMW 社, 蒸気機関を内蔵したガソリンエンジンを開発」

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20051207/111434/>

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

回収することも可能である。図 5.3.6 に BMW 社が発表したガソリンエンジンに蒸気機関を併設するシステムを示す。

(3) スターリング・サイクルによる回収

外燃機関であるスターリング・サイクルにより排気およびラジエーターからの排熱を回収する方法も考えられる。図 5.3.7 に示したスターリング・サイクルの熱源 (Q) がエンジンからの排熱になる。この場合も、ランキン・サイクル利用と同様に駆動力への直接利用と発電機による発電が考えられる。

(4) 熱電変換素子による発電

排気系に熱電変換素子を設置して発電する。この方法には従来から多くの提案がある。

5.3.4 車両周りの希薄エネルギーの活用

5.3.4.1 太陽光発電

サンルーフを太陽電池で作る、あるいは車両のルーフに太陽電池を設置する試みはかなり以前から行われている。設置面積としては $1 \sim 2 \text{ m}^2$ が可能であ

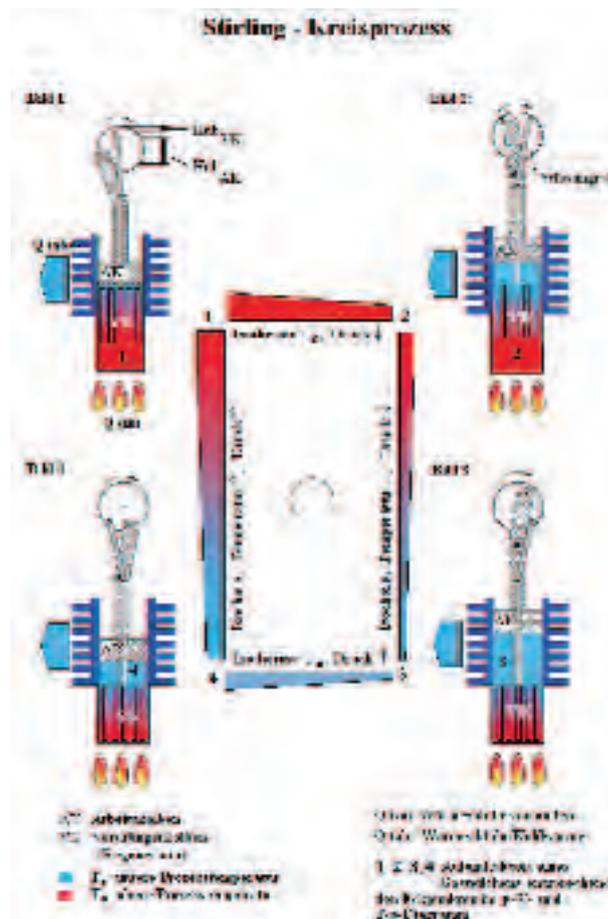


図 5.3.7 スターリングサイクル
【出典】「スターリングエンジン」Wikipedia

るが、得られる電力はそれほど大きくないため、これまで実用化されたものでは炎天下での駐車車両内の換気のための換気扇駆動程度である。車載電池が大型になり充電容量が増えた場合には、利用価値が上がることも考えられる。

5.3.4.2 車両振動エネルギーの活用

サスペンションやエンジンマウントなどの振動部分に圧電素子や電磁発電器などを取り付けて振動エネルギーを電気に変換する試みも行われている。車両の補機電力がまかなえる電力が得られるようになれば利用価値はかなり上がると考えられる。

5.3.5 自動車周りの希薄エネルギーの活用への期待と課題

自動車からの排熱や車両周りの希薄エネルギーの活用は自動車のCO₂低減の観点から大いに期待されるが、最大の課題はコスト効果である。回収エネルギーに対する付加装置のコストや設置容積（および重量）が充分に見合うものでなければならない。

1
本ワークショップ
の位置づけと開催
経緯2
CRDS仮説と
ワークショップで
の検証討論結果3
事前アンケート分
析結果4
エネルギー変換技
術と課題5
需要側からみた希
薄分散エネルギー
活用技術6
まとめと提言

執筆者一覧

付
録

6. まとめと提言

松本 紘（京都大学）

人間は電気利用が始まった当初からいつでもどこでも（ユビキタスに）利用をめざしていた。イタリアのボルタが有名なボルタ電池を発明したのが1799年、フランスでピクシーにより直流発電機が発明されたのが1832年、イギリスでアームストロングが水力発電機を発明したのが1840年である。つまり、大規模な発電所から送電線でつながった電力を利用するよりも何十年も早く、化学反応を利用した電源をユビキタス的に利用できる環境を人々はめざしたのである。電力網が発達した現在でもこの指向は強く蓄電池や燃料電池等、電池の発展は目覚しく、継続時間も飛躍的に伸び、携帯機器の発展には欠かせぬものとなっている。

しかし、どんなにすばらしい電池も化学エネルギー変換を用いている以上、原料切れによる「いつかは切れる」という不安が常に付きまとう。継続時間の飛躍的発展によりかなりの不安は解消されたが、会議中、移動中、人々は常にコンセントを探し、「つながっている」ことに安心感を覚える。また逆に、近年技術の進歩により、非常に小電力でも動作可能なデバイスが増加してきた。IC、LED、センサ、有機EL等、ボルタの時代には存在しなかったmW- μ Wで動作するデジタルデバイスが発展し、既存の電池ほどの容量・出力を必要としないものも発達してきた。

このような現状の中、様々な微弱分散エネルギーを変換する技術が注目を浴び始めている。携帯する原料がエネルギーリソースとなる電池と異なり、エネルギーリソースは我々の周囲に無限に存在する光、電磁波、熱、振動（運動）、生体エネルギー等であり、太陽や地球の活動、人間の社会活動、生体の活動等がリソースであるために擬似的に「常につながっており、エネルギーリソースが切れぬ」ことになる。微弱分散エネルギーを活用することでmWから μ Wの領域で動作するデジタルデバイスのバッテリーレス化、メンテナンスフリー化も可能となり、壁埋め込み型センサーやバッテリーレス電子ペーパー等、これまでに電池切れの不安から実現しなかった新しいアプリケーションが生まれる可能性があり、また実際に実用化に向けた取り組みも始まっている。希薄分散エネルギーの課題は利用しにくい希薄分散エネルギーをどのように利用しやすい例えば電気エネルギー等に変換するか、である。本WSではこの技術に関して多面的に検討するために行われたものであり、技術現状と課題を明らかにしたものである。

一口に希薄分散エネルギーと言ってもそのエネルギー密度や変換技術は様々である。太陽光エネルギーは最大100 mW/cm²と他のすべての希薄分散エネルギーに比べると数桁エネルギー密度が高く、それだけに家庭用や発電所用の大規模応用のために世界中で様々な研究が行われている。しかし、太陽光エ

エネルギーはそのエネルギー密度は天候や時間や場所によって著しく変動するという弱点がある。そのため、バッテリーレス化、メンテナンスフリー化志向の希薄分散エネルギーとして用いるためには出力安定化と電力貯蔵の技術が必須である。しかも化学エネルギー変換の2次電池ではなく、原理的に異なるような長寿命・メンテナンスフリーの電力貯蔵一体型太陽エネルギー変換技術の研究が必須であり、大規模応用の太陽エネルギー利用とは方向性を異にする。

電磁波エネルギーは自然界に存在するものは桁外れに小さく、希薄分散エネルギーとしても利用は難しい。20世紀以降の人間が電磁波エネルギーを人工的に作り出し利用し始めて以来、電磁波は地球を満たしているため、希薄分散エネルギー源として利用できるという特徴がある。逆に広い範囲にわたるエネルギー源を「発信器」を使って人為的に作り出すことも容易であるし、更に情報送受信と組み合わせることで希薄分散エネルギー応用として重要なセンサやIC等、遠隔地・近接不可能なアプリケーションの操作・応用が容易となる特徴もある。送信源をある程度近くに配置することで $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \sim 1 \text{mW}/\text{cm}^2$ のエネルギー密度も実現可能である。電磁波利用はMaxwellやHerzの時代からエネルギー利用が検討され、Teslaによる電磁波エネルギー伝送の実験も20世紀初頭には行われている。Teslaの時代にはmW以下のアプリケーションが存在しなかったためこの実験は成功しなかったが、現在はRF-IDという電磁波エネルギー応用のアプリケーションが実用手前まで来ている。今後も情報送受信との組み合わせによる電磁波のエネルギー利用は重要となると考えられる。

熱エネルギー利用も古くは熱そのものの形態での利用から広義の熱利用である蒸気機関まで歴史は古いが、本WSで取り扱った電気エネルギーへの変換も含め、エネルギー密度（温度差）が低いものからのエネルギー変換が重要な課題となる。また熱エネルギーは容易に拡散するため、熱源の維持も重要な課題であり、研究の余地が多い。高温環境での熱発電、熱利用の研究は多く行われているが、 $40 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 程度という希薄分散エネルギーとしての熱源利用、低温からのエネルギー変換は手法や効率も含め研究の期待が高い。

振動（運動）エネルギーは機械的なエネルギーソースであるために大規模な運動エネルギーから電気エネルギーへの変換、つまり発電機の研究がほとんどであった。しかしPower MEMSにより機械と電気を同じ半導体の上で扱えるようになって $1 \text{mW}/\text{cm}^2$ 程度のエネルギー密度の振動（運動）エネルギーが希薄分散エネルギーとして利用できる可能性が示され、格段の技術進歩を見せ始めた。ICやLEDの発展よりも以前から消費電力が数十 μW 以下と非常に少なかった腕時計では自動巻きやゼンマイを用いた機械的な充電等、技術が先行しており、今後のPower MEMSを用いた振動エネルギー利用との相互発展が期待される。

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

化学エネルギー変換のうち、バイオ電池や人工光合成といった生体・植物の生体活動を利用・応用したエネルギー変換は生物の生命活動自体がエネルギー源となるため、再生可能エネルギーソースとして期待が高い。また、医療のIT化が進む中、「電源がいつかは切れる」という不安が最も強い領域である医療関連で、生命活動が続く限り電気を得られるこれらの希薄分散エネルギーは人間の究極の目標である生命維持に必須であり、研究の発展が期待される。

本WSで取り上げたこれらの希薄分散エネルギー以外にも様々な希薄分散エネルギーが我々を取り巻いているが、本WSでは近年研究の進歩が著しい光・電磁波・熱・振動（運動）・バイオを取り上げた。世界的に見ても Energy Harvesting というキーワードで21世紀に入り論文が急増しており、ヨーロッパでは Energy Harvesting に関する複数の大きなプロジェクトが進行し、アメリカでは電磁波（マイクロ波）を用いた Energy Harvesting の商品（クリスマスツリーのLED）が来年市販されようとしている。しかし残念ながら我が国においてはこの重要な希薄分散エネルギーの研究はそれぞれの学会／業界の一部として文字通り「希薄分散」してしまっており、ヨーロッパのように研究や予算を集中できておらず、結果として研究者が十分にその実力を発揮できなくなっている。例えば先述のように大規模発電としての太陽電池の研究は多数あるが、強度変化の著しい室内光を前提とした安定出力の太陽電池の研究は少ない。電磁波の研究のほぼすべては通信とレーダーのためであり、エネルギー利用のための研究はグループとしてはまとまりきっていない。低温利用の熱発電も、バイオ発電もそれぞれの学会／業界の主流から見ると小さなグループである。いくら重要な研究であっても学会／業界の中の一部でしかなければ「萌芽研究」扱いで小額な予算しか獲得できず、結果いつまでたっても「萌芽」から抜け出せない。本WSで扱ったような様々な希薄分散エネルギー技術を「希薄分散エネルギー」という大きなカテゴリーとしてまとめることで初めて研究分野が形成され、正のフィードバックがかかり研究が発展し、逆にその結果が本来の学会／業界へスピンオフとしてフィードバックも出来ることになる。

電気エネルギーは人類が用いている最も使い勝手がよいエネルギーであり、他の様々なエネルギーから変換して用いたいという要求が高い。そして希薄分散であっても常にエネルギーが供給され続け、電気エネルギーとして無限に利用できるとなれば、電気エネルギーが紙やエンピツと同じように「あって当然」というパラダイムシフトが起こるであろう。そのようなパラダイムシフトが起これば人類が蒸気エネルギーを得て、次に電気エネルギーを得たような全く異なる次元へと人間活動を導くことすら出来ると期待する。そのような期待は過大すぎるかもしれないが、蒸気や電気を始めて目にした人間もおそらく同じ感想を持っていたのではないだろうか。「何か使えそうだけど今は別にこんなものは使えない」という現状肯定どまりの感想である。しかし微弱分散エネルギー

はすでに一部で腕時計やRF-IDのような実用的なアプリケーションが先行している分野もあるのである。今後希薄分散エネルギーのアプリケーションが広まっていくとして、一つ一つの電力量は微々たるものであるが、RF-IDやセンサノードのように総量として何千億個を想定すればその総電力量は膨大なものとなる。この新しい電力需要を既存の発電/蓄電でまかなわず、希薄分散エネルギーでまかなうことは地球の温暖化対策にも大切であるといえる。まだ基礎研究レベルにとどまっている様々な希薄分散エネルギー研究が今後蒸気機関を生み、電灯やテレビを生む可能性は高いのではないだろうか。「ダーウィンの海」を越え、次のステップに移るためにも希薄分散エネルギー研究は一つの分野として相互に協力をはかるべきである。

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS仮説とワークショップの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

◆執筆者一覧

- | | | |
|-----|-------|-----------|
| 4.1 | 井上 誠 | (コマツ) |
| 4.2 | 鈴木 雄二 | (東京大学) |
| 4.3 | 篠原 真毅 | (京都大学) |
| 4.4 | 瀬川 浩司 | (東京大学) |
| 4.5 | 井上 晴夫 | (首都大学東京) |
| 4.6 | 谷口 功 | (熊本大学) |
| 4.7 | 池田 篤治 | (福井県立大学) |
| 5.1 | 斉藤 豊 | (タキオン) |
| 5.2 | 道関 隆国 | (立命館大学) |
| 5.3 | 斎藤 昭則 | (豊田中央研究所) |
| 6. | 松本 紘 | (京都大学) |

1
本ワークショップ
の位置づけと開催
経緯

2
CRDS 仮説と
ワークショップで
の検証討論結果

3
事前アンケート分
析結果

4
エネルギー変換技
術と課題

5
需要側から見た希
薄分散エネルギー
活用技術

6
まとめと提言

執筆者一覧

付
録

付 録

- 付録1 ワークショッププログラム
- 付録2 ワークショップ参加者一覧
- 付録3 CRDS 仮説アンケートフォーム
- 付録4 現状と課題アンケートフォーム
- 付録5 研究推進方法アンケートフォーム
- 付録6 CRDS 仮説アンケートのまとめ
- 付録7 国内ノートPC、携帯電話の生産台数とアルカリ電池
(単3、単4) 販売数の推移

付録1 「希薄分散エネルギー活用技術」に関する 科学技術未来戦略ワークショッププログラム

日時：平成19年10月11日（木）8:50～17:40

場所：独立行政法人 科学技術振興機構
研究開発戦略センター 2階大会議室

8:50～9:00	主催者挨拶 研究開発戦略センター長 著作物の取り扱いについて	生駒 俊明（JST） 波多腰 玄一（JST）
9:00～9:15	WSの目的及び期待するアウトプット	松本 紘（京都大学）
希薄分散エネルギー活用（変換）技術と課題		司会：波多腰 玄一（JST）
9:15～9:40	熱電素子を用いた微小温度差発電	井上 誠（コマツ）
9:40～10:05	マイクロ環境振動発電機	鈴木 雄二（東京大学）
10:05～10:30	電磁波エネルギー変換	篠原 真毅（京都大学）
10:30～10:55	色素増感太陽電池	瀬川 浩司（東京大学）
10:55～11:20	人工光合成と光駆動型燃料電池	井上 晴夫（首都大学東京）
11:20～11:45	バイオ燃料電池	谷口 功（熊本大学）
11:45～12:10	生体エネルギー変換素子	池田 篤治（福井県立大）
12:10～13:00	昼食	
全体討論		
13:00～14:15	全体討論Ⅰ：既存技術のブレークスルー誘発研究課題	司会：松本 紘（京都大学）
需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術		司会：波多腰 玄一（JST）
14:15～14:40	電子機器側での対応事例	斉藤 豊（タキオン）
14:40～15:05	バッテリーレスシステムのセンサネットワークへの応用	道関 隆国（立命館大学）
15:05～15:30	自動車の排出エネルギー活用への期待	斎藤 昭則（豊田中研）
15:30～15:45	休憩	
全体討論の続き		
15:45～17:15	全体討論Ⅱ：新しいエネルギー変換技術創出のための研究課題	司会：松本 紘（京都大学）
WSの総括		
17:15～17:35		松本 紘（京都大学）
閉会の挨拶（今後の作業について）		
17:35～17:40		波多腰 玄一（JST） 以上

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS仮説とワークショップの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

付録2 ワークショップ参加者一覧

松本 紘	京都大学 理事・副学長	コーディネーター
池田 篤治	福井県立大学 生物資源学研究科 教授	
石川 容平	株式会社 村田製作所 次世代技術研究所 所長	
井上 晴夫	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 教授	
井上 誠	コマツ 顧問	
岸 則政	日産自動車株式会社 エキスパートリーダー	
北野 正雄	京都大学 工学研究科 教授	
五戸 康広	株式会社 東芝 研究開発センター 研究主幹	
斎藤 昭則	株式会社 豊田中央研究所 取締役	
斉藤 豊	株式会社タキオン 技術部 専務取締役	
篠原 貞毅	京都大学 生存圏研究所 准教授	
鈴木 雄二	東京大学 大学院工学系研究科 准教授	
瀬川 浩司	東京大学 先端科学技術研究センター 教授	
田中 秀治	東北大学 大学院工学研究科 准教授	
谷口 功	熊本大学 工学部物質生命化学科 教授	
道関 隆国	立命館大学 理工学部 電子情報デザイン学科 教授	
外村 博史	日産ディーゼル工業株式会社 マーケティング商品本部 部長	
丹羽 直幹	鹿島建設株式会社 技術研究所 上席研究員	
吉川 暹	京都大学 エネルギー理工学研究所 教授	
西川 康	文部科学省 大型放射光施設利用推進室 課長補佐	
古村 大輔	経済産業省 研究開発課	
生駒 俊明	科学技術振興機構 研究開発戦略センター センター長	
石原 聡	科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー	
石正 茂	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー	
石森 義雄	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー	
伊東 義昭	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 主任調査員	
勝山 光太郎	科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー	
金子 博之	科学技術振興機構 研究領域総合運営部 調査役	
菊地 博道	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 企画運営室 調査役	
嶋山 一義	科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー	
豊蔵 信夫	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー	
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー	
丹羽 邦彦	科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー	
波多腰 玄	科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー	
日夏 健	科学技術振興機構 研究領域総合運営部 部長	

(五十音順)

付録3 CRDS 仮説アンケートフォーム

CRDS仮説アンケート

御回答者名:

CRDS仮説	Yes No	Yes、Noの回答理由及びコメント
① いたるところに分散しているが現在利用されていない希薄なエネルギー(例えば:電磁波、光、温度差/変化、気圧差/変化、弱風、物体の運動、生体内エネルギーなど)を利用する技術を開発するために、5年間50億円をかければ、数種類の萌芽的な技術が獲得できる。		
② そしてそれらの技術が実用化されれば、IC、センサ及び一部のモバイル機器のバッテリーが不要になる。より大容量の電源が必要なモバイル機器においても、これら技術による常時補助充電により充電作業から解放され、機器の大幅な長寿命化が可能となる。またこれによって1次電池が削減されることにより環境問題緩和にも貢献する。		
③ 希薄分散エネルギー活用技術は、エネルギー変換技術・変換用新材料、エネルギーの極低損失蓄積技術、システム制御技術の観点から未開の分野であり、それぞれ難関を突破する技術が必要である。この中でもっとも大きなブレークスルーが要求されるのは変換技術である。		
④ エネルギー変換技術としては熱電変換効率を10倍改善、運動電気変換効率の5倍改善、光電変換効率の5倍改善ができる。		
⑤ これらの技術は、自然界に存在する希薄分散エネルギーに加えて、人工的な擬似分散エネルギーを作ってそれを活用する技術としても応用できる。		

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS 仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

付録4 現状と課題アンケートフォーム

現状と課題アンケート（記入者名）

説明項目		提案 A	
希薄分散エネルギー活用技術の名称			
ターゲットパワー密度			
目標とする用途			
使用エネルギー源			
変換方式			
提案技術の仕様	現状	課題解決後 (5年以内、10年以内)	
V max	(V)	(V)	
I max	(mA)	(mA)	
最大電力容量	(mW)	(mW)	
電力使用形態			
設置条件			
動作温度	- 度 ~ + 度	- 度 ~ + 度	
大きさ			
重量	(g)	(g)	
提案技術の特徴 (新規性)			
研究開発課題及び課題解決の具体的方法			
エネルギー変換技術 (変換素子の概念図、できれば用途の 概念図も含む (次ページ))			
周辺要素技術 エネルギー給電技術 エネルギー蓄電技術 回路技術 パッケージング技術			
基礎物性			

付録5 研究推進方法アンケートフォーム

研究推進方法アンケート

記入者： _____

希薄分散エネルギー活用技術名： _____

What : ターゲットは何か	
Who : 単独でやるか、合同か	
Where : 産官学のどこで	
When : 研究期間と開始時期	
Why : 何故(今)必要か	
How : 研究体制、推進方法	

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側からみた希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

付録6 CRDS 仮説アンケートのまとめ

付録 6. 1

CRDS仮説回答まとめ(1)

① いたるところに分散しているが現在利用されていない希薄なエネルギー(例えば:電磁波、光、温度差/変化、気圧差/変化、弱風、物体の運動、生体内エネルギーなど)を利用する技術を開発するために、5年間50億円をかければ、数種類の萌芽的な技術が獲得できる。

賛成	反対
<ul style="list-style-type: none"> ただし、世界的な激しい競争の中で我が国が優位に立つにはある程度の集中が必要だと思う。初期的には広範な技術に取り組み、その後、選択・集中をしようか。 米国でもEnergy Harvestingが盛り上がりつつある。日本の優位技術(2次電池/DLC)を生かし、さらにこれから、変換技術を開発し環境技術立国としての国際的ポジションを強化すべき。人口密度が高く、地理環境の変化に富む日本ではさまざまな可能性にチャレンジし易い。 50億円の費用の根拠が固いかわるが、効率とコストおよび独創性の高さを問わなければ、5年間あれば萌芽的な技術は獲得できると思う。 僅かなエネルギーで動作する機器が、今後デバイスの進化と共にますます増え続け、利便性の高い社会に向かうと考えられる。今後の研究開発で3年間、さらに2年間で実用化開発が可能と思われる。 細胞のエネルギー変換機能を利用した生体触媒エネルギー変換素子の技術開発には、電気化学、生化学、化学工学、酵素化学、応用微生物学、無機材料科学などの多岐にわたる基礎技術の融合が必要である。したがって、目標を明確にした関連分野の有機連携、そのための拠点形成が必要であり、それに見合った研究資金が必要である。 環境電界→収穫、貯蔵、送る、運動エネルギー変換機構、貯蔵、再変換、これらに新規・萌芽的技術を期待できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 左記技術(エネルギーハーベスティング)に関しては、既に数多くの萌芽的な技術が出ていて、これらの技術にとって、何にどのように使うかが最も重要な研究開発ポイントである。3番目の設問とも関連。画期的なエネルギー変換材料が出るかどうか、必ずしもお金の問題でもないと思う。4番目の設問とも関連。 希薄なエネルギーから電力への変換技術は既に存在するので、実用化(容積、重量、コスト)の見直しをもてる技術の開発が必要。適用先の選択と併せて、ターゲットが適当なら5年間50億円なら可能。 5年間50億円の根拠は不明であるが中長期的な研究投資を継続することは必要不可欠である。 50億円の費用の根拠が固いかわるが、効率とコストおよび独創性の高さを問わなければ、5年間あれば萌芽的な技術は獲得できると思う。 エネルギー源だけではなく、電圧変換技術、極低電力LSI技術まで含めて開発すれば、数種類の萌芽的な技術が獲得できる。ターゲットは、健康・医療関連の分野が妥当。 当該技術の基幹となるエネルギー変換技術は、ナノテクノロジーなど先端技術の進歩に伴い、飛躍的に前進する可能性のある技術であるため、萌芽的な技術の獲得は十分に可能であると考えられる。 熱電変換系 ・人工光合成系 ・光電変換系でのブレイクスルーが期待できる。
<ul style="list-style-type: none"> IC、センサ類の電源には使えると思うが、容量の大きなモバイル機器には困難と思う。(コスト面からの制約が大きいと思う。現状の一次電池を凌駕するコストを実現するのは難しい) 	

資料 6. 2

CRDS仮説アンケートの纏め(2)

② そしてそれらの技術が実用化されれば、IC、センサ及び一部のモバイル機器のバッテリーが不要になる。より大容量の電源が必要なモバイル機器においても、これら技術による常時補助充電により充電作業から解放され、機器の大幅な長寿命化が可能となる。またこれによって1次電池が削減されることにより環境問題緩和にも貢献する。

賛成	反対
<ul style="list-style-type: none"> 米国でもEnergy Harvestingが盛り上がりつつある。日本の優位技術(2次電池/DLC)を生かし、さらにこれから、変換技術を開発し環境技術立国としての国際的ポジションを強化すべき。人口密度が高く、地理環境の変化に富む日本ではさまざまな可能性にチャレンジし易い。 希薄エネルギーが活躍する場面は明らかにモバイルである。小さな電力でウェアラブルな様々な機器が考えられる。時計や眼鏡、携帯電話などは典型的な例である。今後、ノートパソコン、温度コントロール衣服、障害者用道路案内システム等多くの通信・センサーシステムにその応用が拡大するであろう。電池の使用量削減は環境を守る。ストックからフロー型社会へ。 身近にある飲料、食糧をエネルギー源として有効に利用できれば、そのエネルギー容量は、例えばグラム(一円玉一個相当)当たり(グルコース換算)3.6Whと、単三アルカリ乾電池の容量約3Wh(体積約8cc、重さ 約16g)に匹敵する。身近な飲料などで再充電可能で、場所、時間、利用者を選ばない利用の道が開ける。また、非常に安全であり、廃棄物及び資源の問題もない(使い捨て可能)。 エネルギー効率的にみれば、装置製造にかかるエネルギーのほうが、変換できるエネルギーより大きくなり、省エネにはならない。電池が不要になる環境負荷的なメリットとともに、利便性向上を認知的にうたえられないか? 長寿命化は可能。環境問題緩和は慎重に議論すべき。 基本的にはその通りであり、利便性の飛躍的な向上が期待できる。しかしながら、環境問題緩和に貢献するかどうかは、総コストにその全てを依存するので、現時点では不明である。 IC、センサ類の電源には使えると思うが、容量の大きなモバイル機器には困難と思う。(コスト面からの制約が大きいと思う。現状の一次電池を凌駕するコストを実現するのは難しい) エネルギー変換方式によって想定される出力が異なるので、大容量電力が必要な機器に役立つかは一概には言えないが、一次電池の削減には確実に寄与できると思われる。 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギーハーベスタの発電量は小さいので、既存の電池に取って替わるのは、極一部の用途(時計、無線センサなど)に過ぎない。しかし、左記の携帯電源に関する要求は本質的に重要であり、電池、燃料電池、バイオ燃料電池、エネルギーハーベスタなどを総合的に研究する価値がある。 これまで見捨てられ、最終的には熱エネルギーとして大気中に放出されたエネルギーではあるが、その総量は弱電系の機器を駆動できる可能性は十分あると考える。また、これらのエネルギー源は、自然エネルギーなど再生可能である場合が多く、環境負荷低減に貢献すると考える 電子機器側対応: 更なるULP化一色々な機器が続々ターゲット圏内に。システム構成での割り切り、例えば電子ペーパーは、電池レス。 希薄エネルギーが活躍する場面は明らかにモバイルである。小さな電力でウェアラブルな様々な機器が考えられる。時計や眼鏡、携帯電話などは典型的な例である。今後、ノートパソコン、温度コントロール衣服、障害者用道路案内システム等多くの通信・センサーシステムにその応用が拡大するであろう。電池の使用量削減は環境を守る。ストックからフロー型社会へ。 ユビキタスエネルギー源として ①光電変換系 ②力学エネルギーとバッテリーとの組み合わせが期待できる

付録 6.3

CRDS仮説アンケートの纏め(3)

③ 希薄分散エネルギー活用技術は、エネルギー変換技術・変換用新材料、エネルギーの極低損失蓄積技術、システム制御技術の観点から未開の分野であり、それぞれ難関を突破する技術が必要である。この中でもっとも大きなブレークスルーが要求されるのは変換技術である。

賛成	反対
<ul style="list-style-type: none"> ・左記はYesであるが、具体的な応用を離れて、エネルギーハーベスタのエネルギー変換技術だけの研究開発をしてはいけない。仕様が決まらなければ、やりやすい研究をすることになり、「発電できるが、使えない」デバイスができるだけである。そのような研究はたくさんある。 ・変換技術は重要であるが、Storageやシステム制御技術を含めた全体技術の組み合わせ、使い方が重要。特定領域に絞るべきかは多少議論があると思う。 ・さまざまな観点で、変換効率を飛躍的に向上させる技術と、エネルギー回生を含めた技術が重要。 ・希薄であるとは言え、利用すべきエネルギーは生活空間に確実に存在する。小さく気ままなエネルギーを利用可能な状態に持っていくことは現状のデバイスの動作範囲(閾値)を考えると難しい。デバイス、方式、システムの各方面から有効なエネルギー変換技術を確立することが最重要課題である。 ・生体触媒素子を用いるシステムは、出力が、温度などの環境によって変動する可能性があるため、その制御システムが必要と考えられるが、現行の技術で十分カバーできる。変換技術の基本に大きなブレークスルーは要求されないが、酵素機能の精密な制御と長期安定性を可能にする変換素子技術の獲得にはブレークスルーが必要である。この技術を獲得すれば、波及効果としてエネルギー変換以外にも多様な生体触媒利用分野にブレークスルーをもたらすだろう。 ・熱電の場合は、希薄分散エネルギーから局所的に温度差を作り出す技術の開発が必要。変換効率の向上は応用範囲を広げていくためには重要な要素。 ・エネルギー変換技術が重要であることは疑いが無いが、仮に100%の変換効率を実現したとしてももとのエネルギー密度がmW/cm^2程度しかないため、エネルギー貯蔵による時間ファクターの向上と、ユーザーのより省電力化が組み合わせなければ有効な「微弱分散エネルギー源」とは言いがたい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー変換技術よりも、高効率、低コスト、高信頼性を確保できる蓄積デバイスのブレークスルーの要求が大きいと思う。 ・システムサイドから見るとLSIの低電力化がまだ不十分であるし、超間欠動作等、工夫の余地あり。システムのバランス設計が大事。変換技術だけにブレークスルーを持たせるのは、危険。 ・希薄なエネルギーであるため、変換効率の良し悪しがシステム投入コストと回収エネルギーの収支を左右する。その観点から、実用化に向けては変換技術が最も重要である。 ・現時点では、「可能性」に留まっていたとしても、将来、社会にとっての選択肢をできるだけ多く準備し提示することが望まれる。 ・エネルギー変換技術よりも、高効率、低コスト、高信頼性を確保できる蓄積デバイスのブレークスルーの要求が大きいと思う。 ・既に他の技術は研究が進行しており、最も遅れていて特に日本で国家的な取り組みが全く行われて来なかったのが変換技術。 ・実用化には変換効率の向上が不可欠。

付録 6.4

CRDS仮説アンケートの纏め(4)

④ エネルギー変換技術としては熱電変換効率を10倍改善、運動電気変換効率の5倍改善、光電変換効率の5倍改善ができる。

賛成	反対
<ul style="list-style-type: none"> ・効率の多少の改善はもちろん望めるが、効率第一ではなく、むしろ、環境負荷、コスト、耐久性、耐環境性などを前提とした開発が重要。 ・希薄エネルギーを用いたブレークスルーサービスを実用化するには熱電変換、機械電気変換、光電変換効率はエネルギー変換というキーワードでグルーピングできる人達の積極的技術交流によって高い目標値が達成される。 ・生体触媒素子は、化学エネルギーの電気エネルギーへの変換素子であり、変換効率は主として素子の電流-電圧特性で決まる。変換素子機能として電流密度10倍増が期待できる。 ・力学電気変換などの技術はすでにかかなりの変換効率レベルになっており、素材単体の5~10倍の改善は困難であると思われるが、使い方も含めたブレイクスルーにより同等の改善も可能であると考ええる。 ・数値目標を掲げて実現できるよう努力することと同時に、社会がそのプロセスを理解することが望まれる。 ・期待を込めてYes。 	<ul style="list-style-type: none"> ・左記のような材料が開発されれば、エネルギーハーベスタに限らず、大きなインパクトとなるが、今のところ新たなブレークスルーの気配はない。 ・単接合で光電変換効率20%が実現されており、5倍にすると100%で理論値を超えてしまう。 ・変換効率とともに変換出力が重要。エネルギー取り入れまで考えたシステムとして考える必要がある。熱電では3倍の改善で十分。
<ul style="list-style-type: none"> ・大きな進歩を期待するが、具体的な数値目標がもつ意味が理解できていないが、目標を持つことは大変良い。 	

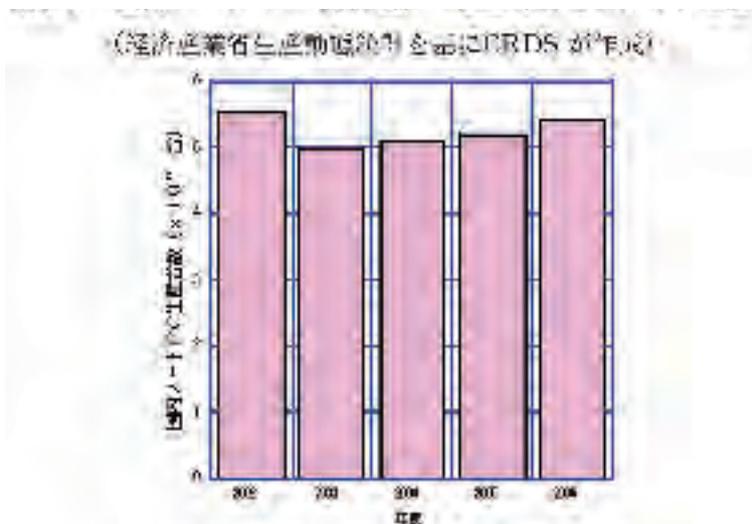
付録 6. 5

CRDS仮説アンケートの纏め(5)

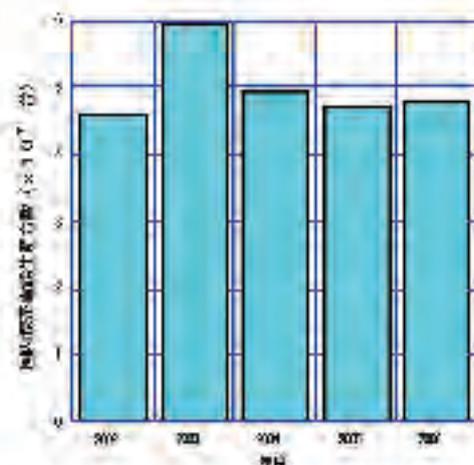
⑤ これらの技術は、自然界に存在する希薄分散エネルギーに加えて、人工的な擬似分散エネルギーを作ってそれを活用する技術としても応用できる。

賛成	反対(0人)
<ul style="list-style-type: none"> ・原理的には応用できると思われるが、効率がかなり低くなるのが懸念される。適切なアプリケーションが必要。 ・電磁カップリング、電波、光、超音波などによる無線パワー供給は、有望な技術である。 ・あえてエントロピーを増やして、その後回収を試みる擬似分散エネルギーの利用については懐疑的な面もある。しかし、目的を明確にした取り組みが期待される。 ・④が成立するならば、可能と思う。 ・希薄な無線電波を使ってエネルギーを伝送することは、電池の化学変化に伴うエネルギー変換でないため環境汚染や人体への影響などの心配が殆どない。効率を考えると問題点も多いがぜひ実現させたい。要素技術確立について困難は伴うが開発可能範囲にあると思われる。 ・飲料、食料は人工的な擬似分散エネルギーともとらえることができる。 ・家庭内の微弱光で動くシステムは可能である。その方向で検討されている光電変換系もある。 ・変動の大きい希薄分散に比較して擬似分散のほうが安定供給可能で、より有効に変換技術を利用可能。しかし擬似分散エネルギーを作り出すエネルギーを考慮したトータルの効率を考える必要あり。 ・擬似分散エネルギーは、そのために新たなシステムを準備するのではなく、既にあるシステムに生じている分散エネルギーを利用することが良作であると考え。また、そのようなシステムは実現可能である。 ・利便性向上のみの視点では可能と考えられるが、環境問題への解答は不明である。 ・④が成立するならば、可能と思う。 	
<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーションによる。 	

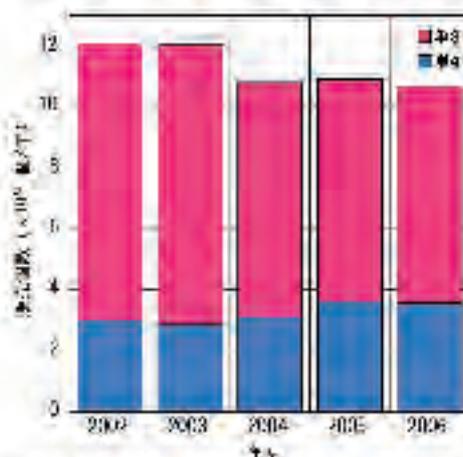
付録7 国内ノートPC、携帯電話の生産台数とアルカリ電池（単3、単4）販売数の推移



図A.7.1 国内ノートPC生産台数の推移



図A.7.2 国内携帯電話生産台数の推移



図A.7.3 国内アルカリ電池販売数の推移

1 本ワークショップの位置づけと開催経緯

2 CRDS仮説とワークショップでの検証討論結果

3 事前アンケート分析結果

4 エネルギー変換技術と課題

5 需要側から見た希薄分散エネルギー活用技術

6 まとめと提言

執筆者一覧

付録

**「希薄分散エネルギー活用技術」に関する
科学技術未来戦略ワークショップ報告書**

CRDS-FY2007-WR-13

平成 20 年 3 月

発行者 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
生駒グループ

〒 102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電話 03-5214-7484

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

Copyright 2007 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
無断での転載、複写を禁じます。引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

