

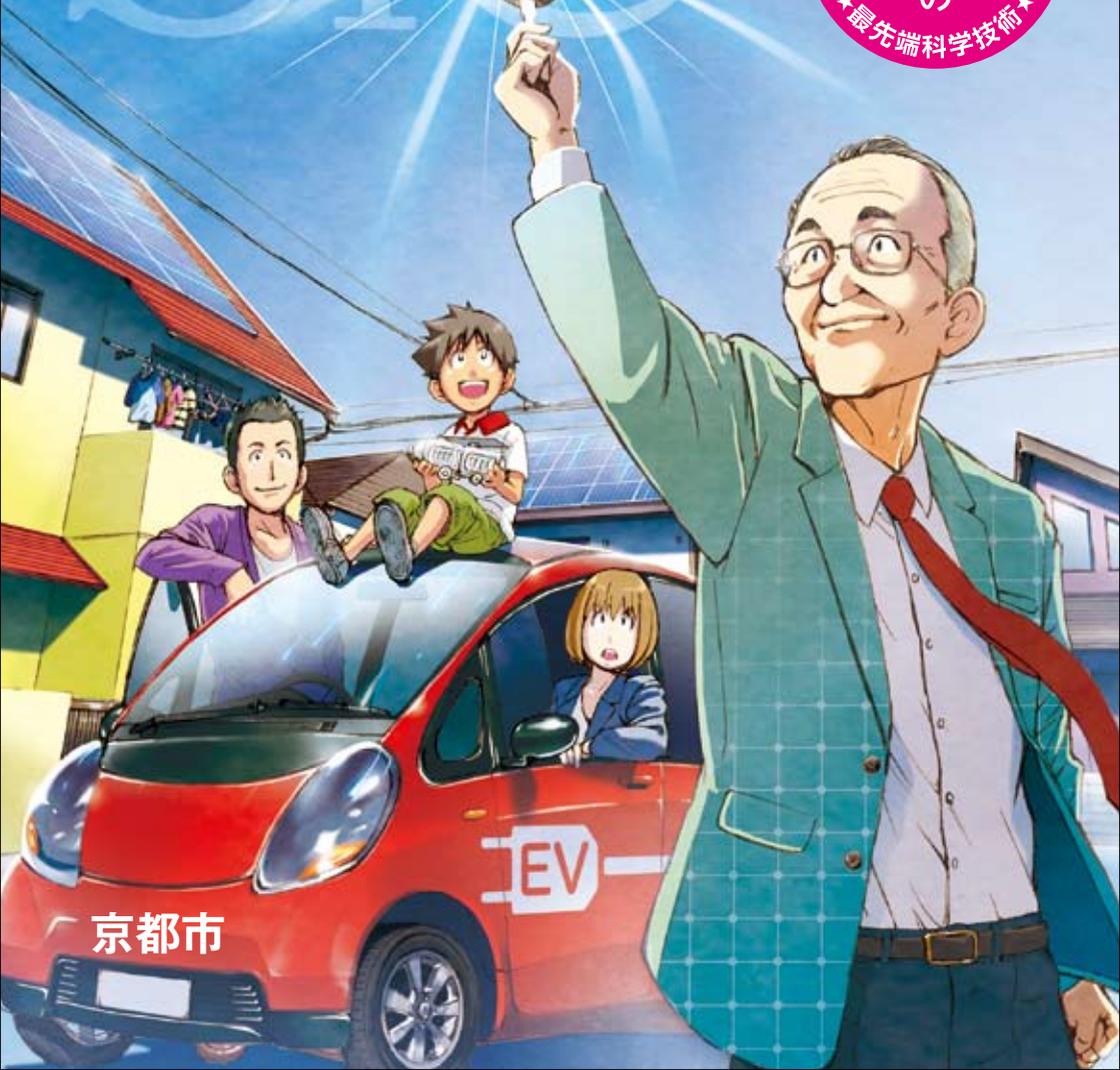
進化する省エネルギー技術！

次世代の 半導体材料

ふりがで知る！

京都
の

★最先端科学技術★



京都市

はじめに

京都市では、平成14年3月に21世紀の産業振興ビジョンである「京都市スーパーテクノロジーシティ構想」を、平成18年10月にはスーパーテクノロジーシティ構想の行動計画である「京都市産業科学技術振興計画」を策定し、京都経済の活性化に向けて、様々な取組を行ってきました。

特に、京都には最先端の優れた研究を進める大学、独自の技術でグローバルな事業展開を進めるユニークな企業が集積しており、京都市では、これらの大学と企業とともに、産学公連携の下、最先端の研究開発を進めてきました。

これらの最先端の研究で開発される技術は、環境・医療をはじめ、今後の市民生活の様々な場面で大きく活用される可能性のあるものです。

そこで、京都市では、これらの研究をマンガでわかりやすく解説し、最先端の科学技術の内容を理解していただくことを目的に、本書を発刊いたしました。

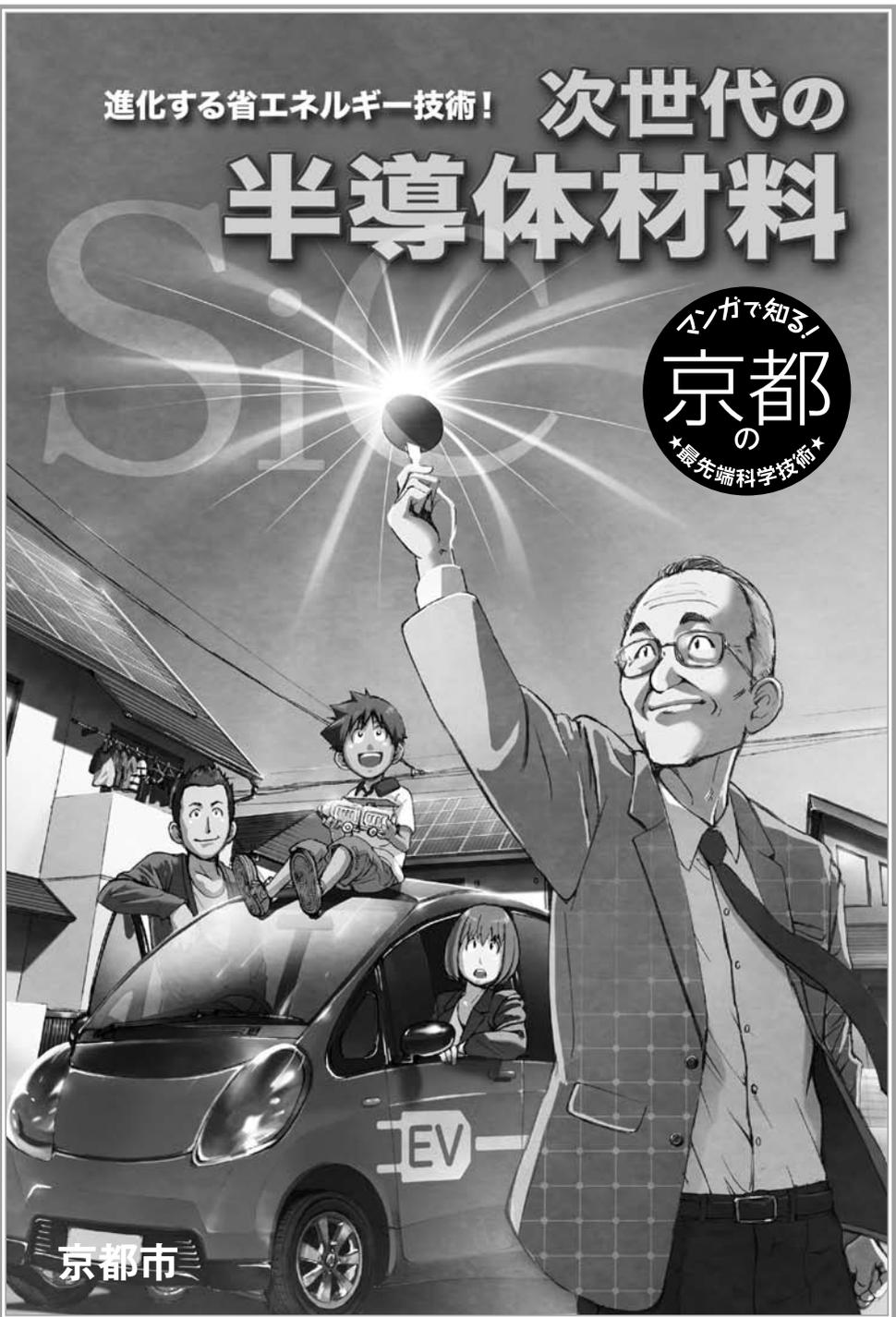
本書では、文部科学省の支援を受けて実施している知的クラスター創成事業(*)で取り組んでいる研究テーマを紹介します。

小中学生の皆様をはじめ、広く市民の皆様には本書をお読みいただき、京都市の大学、企業、行政等が連携して取り組む最先端の科学技術の内容をご理解いただければ幸いです。

平成22年3月

京都市産業観光局産業振興室

*知的クラスター創成事業については、34ページをご参照ください。



パソコン、ケータイ、大画面テレビ。
 夢物語だったこれらを
 身近なものにしたのは
 半導体技術といふ力で



石炭、石油の火力発電が中心だった社会は
 原子力や太陽エネルギー、水素エネルギーなどと
 環境に負担の少ないものと
 入れ替わろうとしています

そのためには
 新しいエネルギー源だけでなく
 電気を作り送電する仕組みが
 必要であり

今こそ半導体技術の
 新たな活躍の場なのです！

半導体技術は光情報通信にも
 活躍の場を広げ
 さらに未来へと
 進ましようとしています

※半導体技術 — 電子部品を作るために必要となる多様な技術。
 ※光情報通信 — 情報を光のオンオフやそのパターンなどに変えて、光ファイバーを利用して有線通信を行うこと。

※ソーラーカー — ガソリンを燃焼させて走行する自動車に対し、太陽電池による発電で走行する自動車。
 ※発電量モニタ — 家庭にある発電機の動作状況を示すモニタ。



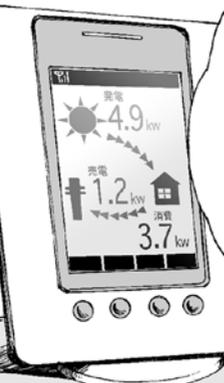
翔太
 出かけるのか？

うん！
 自由研究の
 ソーラーカー実験！！



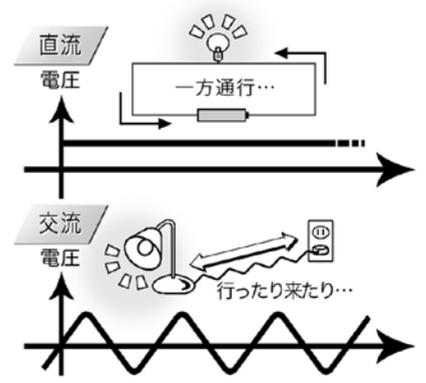
今日は
 天気もいいし
 実験には
 もってこいね

もう 母さん
 また太陽電池の
 発電量モニタ見てたの



そりゃあ
 晴れの日
 電気の節約に
 なるもの

とんちんぽん 5



あそびえばこの前学校で習ったんだけど

このソーラーカーは「直流」で動くのに

え？

なんてうちの太陽電池は「交流」なの？

※直流 — 電流の方式の一つで、時間によって電流の向きが変化しない方式。
 ※交流 — 電流の方式の一つで、時間によって電流の向きが変化する方法。

それって発電所も？

火力発電所とかは交流発電だな

ただ家庭に届くまでには送電や変電でいろいろと変換するから

それで5〜10%くらい電気をロスしてしまうんだけど

発電所から家に届くまで10%もロスするの？

えっ...

そう、日本全体で原子力発電所数基分はロスするそうだし

やだもったいない!!

それじゃあ太陽電池が広まったら

電力の変換はますます大切になるんだね!

お父さん!

けど、交流は直流より遠くまで送電できるから家のコンセントとか広く交流が使われてる

だからインバータという装置を使って直流を交流に変換させているんだ

へー

翔太 太陽電池でできる電気はすべて直流なんだぞ

父 電気会社勤務

※変電 — 電流の大きさや方式を変換すること。
 ※ロス — 本来の目的とは別のところでエネルギーを消費すること。無駄。



一週間後
桂イノベーション
パーク

※ JST
イノベーションプラザ
京都へようこそ！

私が館長の
松波弘之です！

※ JST 独立行政法人科学技術振興機構



キレイな
建物だなあ

ここは大学と企業、京都市
などの行政が協力し合って
大学等での研究成果を
新しい商品開発に結びつけたり
人々の暮らしが豊かになるための
最先端技術を紹介したりする
活動を行っているんだよ



今日はよろしく
お願いします

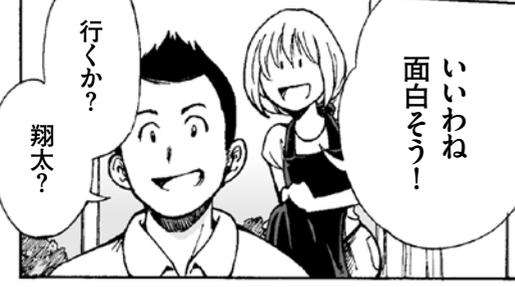
科学技術振興機構
JST Innovation Plaza KYOTO
桂イノベーション
パーク



そう だから
太陽電池の他にも
風力発電や
燃料電池なども

新しい技術によって
改善する研究が
進められてるんだ

そうだ！



いいわね
面白そう！

行くか？

翔太？



うん！！

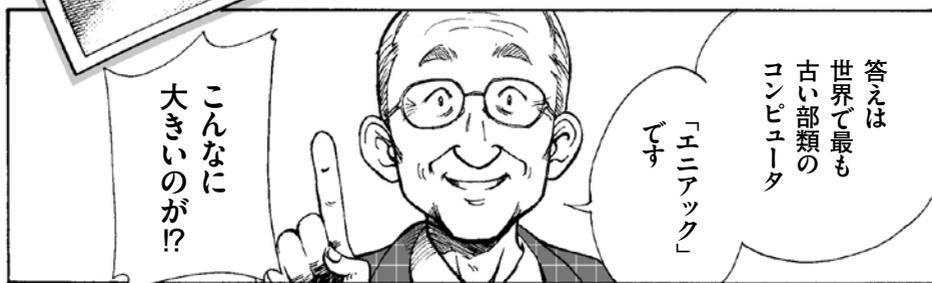
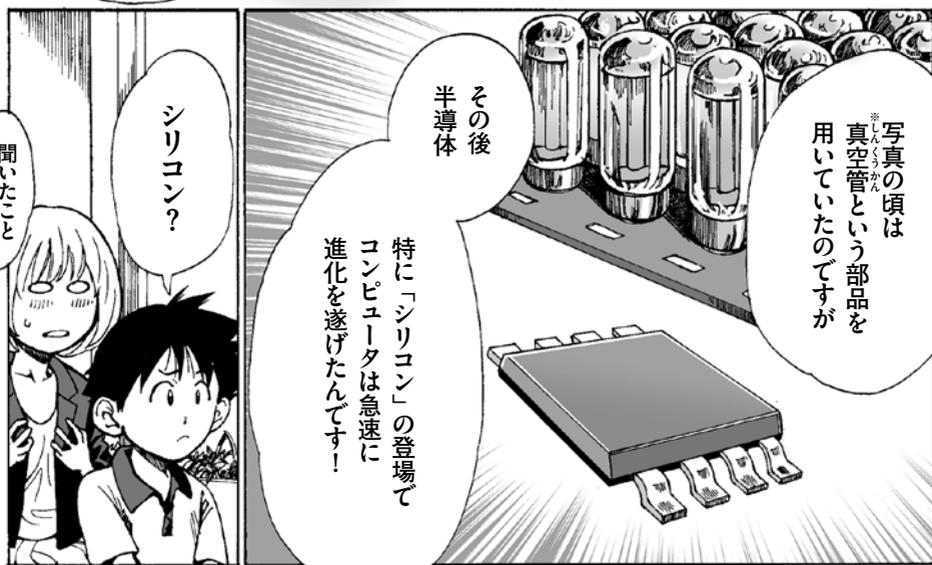
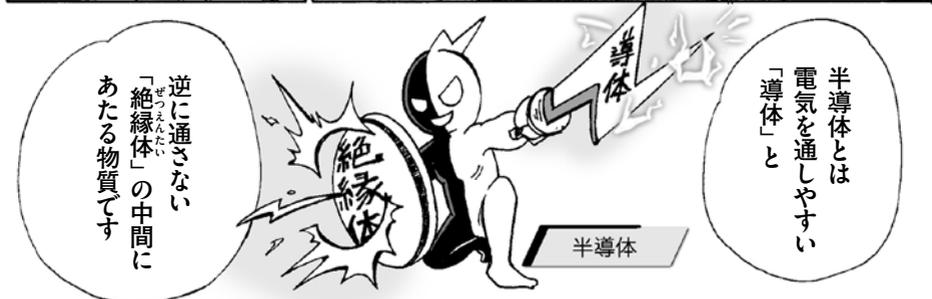


今度
桂イノベーションパークへ
行かないか？

その研究をしている
先生が館長を務める
施設があるんだ！

ホント？

※燃料電池 水素と酸素を反応させることで発電する方式。発生するのは主に水だけで、環境にやさしい発電方法とされている。



これがシリコンを
円盤状にした
シリコンウエハ！

アッ

シリコンは
半導体製品の
最も基本的な
材料なんです！

※ウエハ — 電子部品を作るためにもっとも基本となる材料の一つで、薄い円盤状の形状をしている。
※地殻 — 地球で、海や湖を除く表面部分のこと。地学用語。

これって
鉄ですか？…

シリコン(Si)は
地殻に
豊富に存在する
ケイ素！
いわば砂の成分の
ひとつです

そのケイ素を精製して
シリコンインゴットに

スライスすると
シリコンウエハに
なるんですよ

すごい！
鏡みたいですね！！

※インゴット — 金属などを精製して塊にしたもの。

シリコンウエハは原子の
配列パターンがきれいで
99.999999999999%と
いう高純度の結晶なんです

99.999999999
=イレブン・ナイン

特別なもの
なんです

シリコンは情報処理の
デバイス…つまり装置を
作る上で加工や設計が
非常にしやすい

太陽電池
そのものや
インバータにも
使われています

太陽電池にも！！

※原子 — 物質の最小構成単位。
※配列パターン — 結晶を構成する原子の並び順や配置。

しかし…

太陽電池の高性能化や
電気自動車の
充電スタンド整備に
必要となる
新しいエネルギー
技術の登場で

電力制御分野での
シリコン技術は
限界が見えてきてね…

そこで！

新しく
注目されているのが
シリコンカーバイド！！

To Professor Matsunami

NIPPON STEEL

次世代の
半導体材料なのです！！

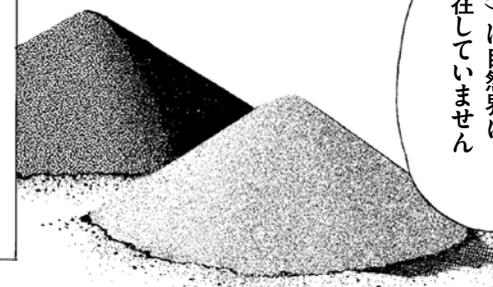
そのシリコン
カーバイドっていうのは
新たに開発された
ものなんですか？

シリコンウエハ
より黒いのね

いいえ
20世紀にはシリコンの
陰に隠れていました

シリコンカーバイドには
うよまがひ 紆余曲折の歴史が
あるんです

シリコンカーバイド
(SiC) は自然界に
存在していません



シリコンカーバイド粉末

SiCはシリコンと
炭素(ダイヤモンド)の
中間の特徴を持っています

ダイヤモンドに硬く
シリコンのような
電気的特性を
持っています

19世紀にアチソンが窯で
ゴロゴロした結晶
アチソンSiCを
作り出します

当時は耐火レンガや
研磨剤などに
使われました



アチソン

※電気的特性 — 材料が持っている固有の電気に対する性質。

※結晶 — 原子レベルで見ると、構成する原子が一定の周期で繰り返した構造をもつ物質のこと。

※耐火レンガ — 暖炉など高温での使用が必要とされることで利用されるレンガ。

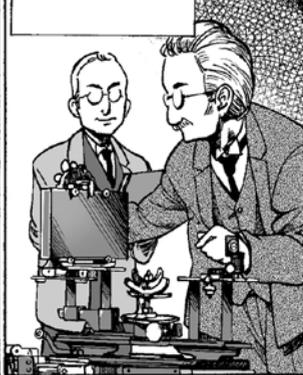
※研磨剤 — 対象の表面を滑らかに磨くために使用される固い粉や粒子。削られるものより固いものが研磨剤に使われるのが一般的。

※物性実験 — 材料の性能を評価するために、その物質の持つ性質を実験的に調べること。

※増幅 — 何らかの入力信号に対して、それより大きい信号を出力する作用のこと。

1907〜23年には
物性実験が行われます

SiCは
シリコンより早く
物の性質が
知られたのです



一方、1948年
半導体の立役者となる
主に電流を増幅する部品

トランジスタが
開発されました！



トランジスタを開発した
ショックレー
ブラッデン パーディーン

その時使われたのは
シリコンではなく
入手しやすい
ゲルマニウム

しかし、ゲルマニウム
トランジスタは
電流によつて発生する
熱に弱く60℃までしか
安定に動作せず

応用には
限界があるな…

多くの研究者が
新たな材料開発に
取り組みました





京都大学工学部で
助手をしていた私も
1960年代後半には
シリコンカーバイドの
重要性を認識し

工学博士となった
1970年頃から
本格的に研究を
始めました

若き日の
松波先生

私はSiCを用いた
二つの研究を
進めています



ひとつは
青色[※]発光ダイオード
の研究

そして
もうひとつは
トランジスタの
研究です

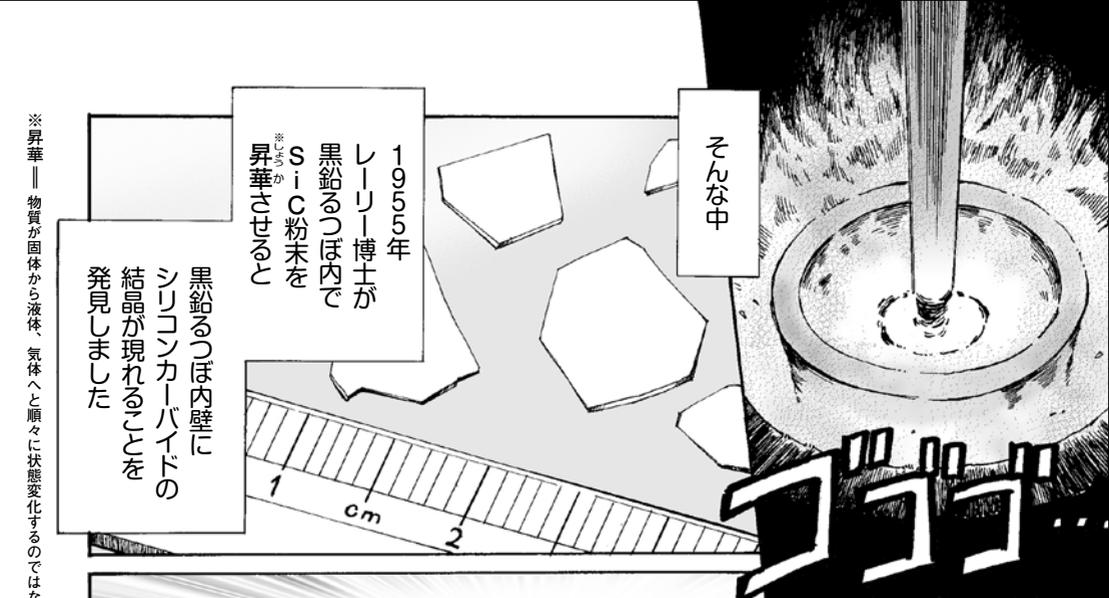


まず北陸の企業から
アチソン結晶SiCを
提供してもらい

また比較的短期間で
成果が見込める
発光ダイオード開発によって
得られるお金を
今後の研究費にあてるつもりです

けど
トランジスタは
莫大な研究費が
かかりますよ

※発光
ダイオード | 半導体の特徴を利用して、電気を直接光
に変えるエネルギー効率の良い発光装置。



そんな中

1955年
レリー博士が
黒鉛のつぼ内で
SiC粉末を
昇華[※]させる

黒鉛のつぼ内壁に
シリコンカーバイドの
結晶が現れることを
発見しました

※昇華 | 物質が固体から液体、気体へと順々に状態変化するのではなく、固体から直接気体へ状態変化する現象。

シリコンカーバイドが半導体材料として
使用できるのではないか!?



この手法は「レリー法」と
呼ばれ、1959年には
シヨックレーが参加した
第一回シリコンカーバイド
国際学会が開催されるなど

多くの研究者が
そのデバイス化に
挑みはじめたのです



それはね

SiCは結晶化が
難しいからといって
切り捨てるには
あまりに勿体ない

優れた特性を
持っているからです

私はSiCを
半導体産業の中心に
出してやりたいんです

※グラファイトるつぼ ーるつぼは材料を高温で溶かし混ぜ合わせる容器のこと。グラファイト高純度の炭素材料は高温に耐えられることから、容器の材料として使われている。
※エピタキシャル ー薄膜結晶成長の手法の一つで、基板となる結晶の周期構造に合わせて、上に結晶を成長させる方法。



しかし

トランジスタは
"シリコン"で
決まりだな！

こうなりや
別の研究で
成果たそうぜ！



この頃には既に
シリコン製のトランジスタ
が登場し、SiCの半導体
研究の波はみるみる引いて
しまったのです

大々的なSiCの
研究が難しくなっても
私は諦めないぞ！

液相エピタキシャル成長

C グラファイトるつぼ
Si 溶解シリコン

そこへSiC種結晶を
入れることにより
SiC膜が成長する
これを液相エピタキシャル
成長といいます

発光ダイオードに用いる
SiCデバイス製造には
液相成長装置を用いました

※グラファイトるつぼ(組成:C)
の中でシリコン(Si)を
1420°Cに加熱すると
溶け出したグラファイトと
シリコンが混じりあい

私たちは
青色発光ダイオードの開発を中心に
SiCの研究を続けました

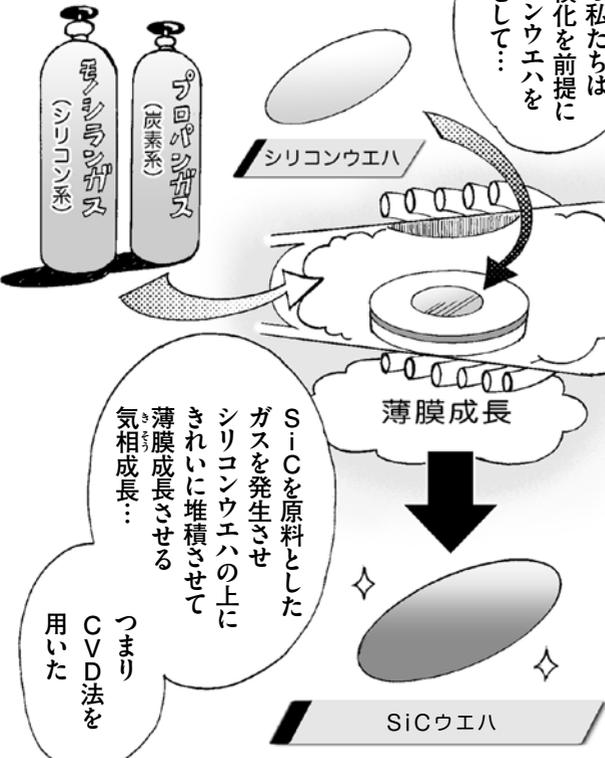


お言葉ですが
先生ー

発光ダイオードはともかく
トランジスタはシリコンが
主流になっているのに

先生はなぜSiCの
研究を続けられるの
です？

CVD法
(Chemical Vapor Deposition)



だから私たちは
大面積化を前提に
シリコンウエハを
下地として…

まずレーリー法では
質の高い結晶はできるけど
大きさや形状が
まちまちになる

また液相成長では
高品質なウエハは
望めない



※周期的な構造——一定の間隔で同じものが繰り返している構造。
※オングストローム——1オングストロームは100億分の1メートル。原子1つ1つのサイズを示すのにちょうどよいサイズで化学や材料などをよく使われる。

SiCを原料とした
ガスを発生させ
シリコンウエハの上
にきれいに堆積させて
薄膜成長させる
気相成長…

つまり
CVD法を
用いた



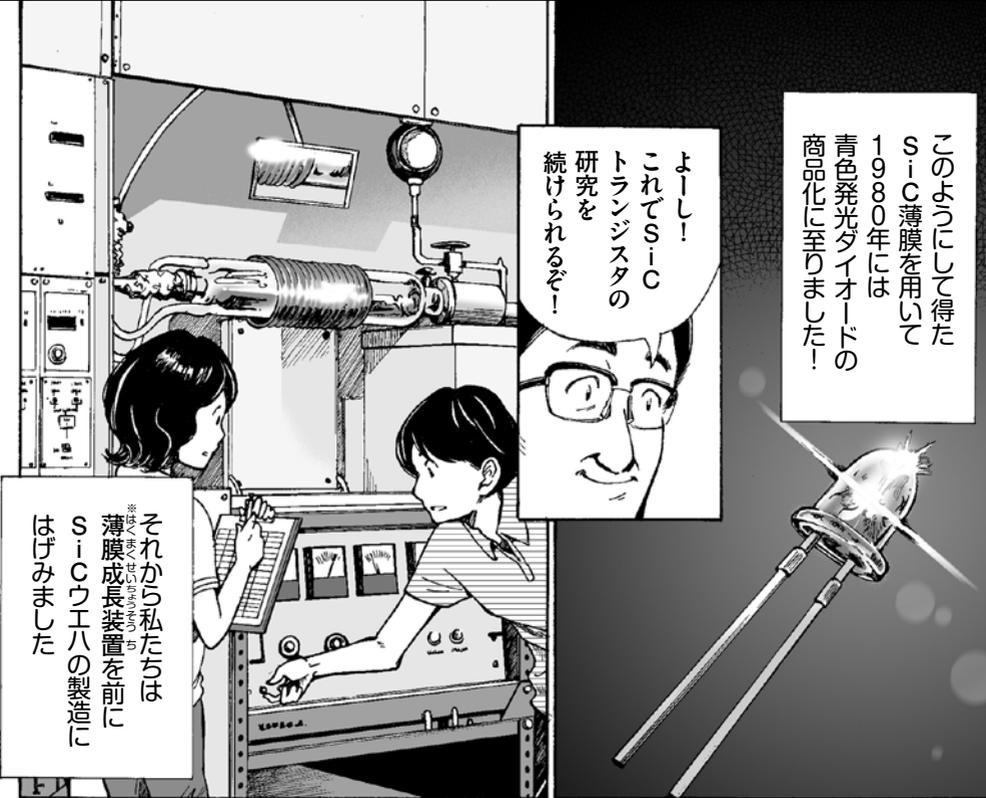
結晶は規則正しい
周期的な構造を
しているから！

しかし現状は
このとおり
異なる結晶の上に
別の結晶を
成長させるのは
容易ではないと
いうわけさ

シリコン(Si)の周期は
543オングストローム(A)
シリコンカーバイド(SiC)では
436オングストローム
でしたね

このようにして得た
SiC薄膜を用いて
1980年には
青色発光ダイオードの
商品化に至りました！

よし！
これでSiC
トランジスタの
研究を
続けられるぞ！



それから私たちは
薄膜成長装置を前に
SiCウエハの製造に
げましました

※薄膜成長装置——半導体製造装置の一つで、原子数層の単位で制御しながら膜を作成する装置。

しかし…
何でこうもSiCって
高品質なウエハが
作りにくいんだよ…

まったく…

シリコンの場合
溶解させると
大きな結晶ができるから
欠陥の少ない
滑らかな表面の
ウエハができるのに

SiCの場合
とても溶かすことは
できないからね

シリコンウエハの
表面結晶



先生！



こうしてできた
SiC基板は良質で
実験室レベルでの
半導体デバイスの製作を
可能にしたのです!

※核融合炉 — 核反応を応用した融合炉のこと。
※エレクトロニクス — 電子工学。電磁気にかかわる現象を説明し、製品の応用に結び付けていく学問のこと。



松波先生の
研究成果は
すばらしい!
我々はアメリカで
SiCを核融合炉の
壁面材料に利用する
研究をしていたんです

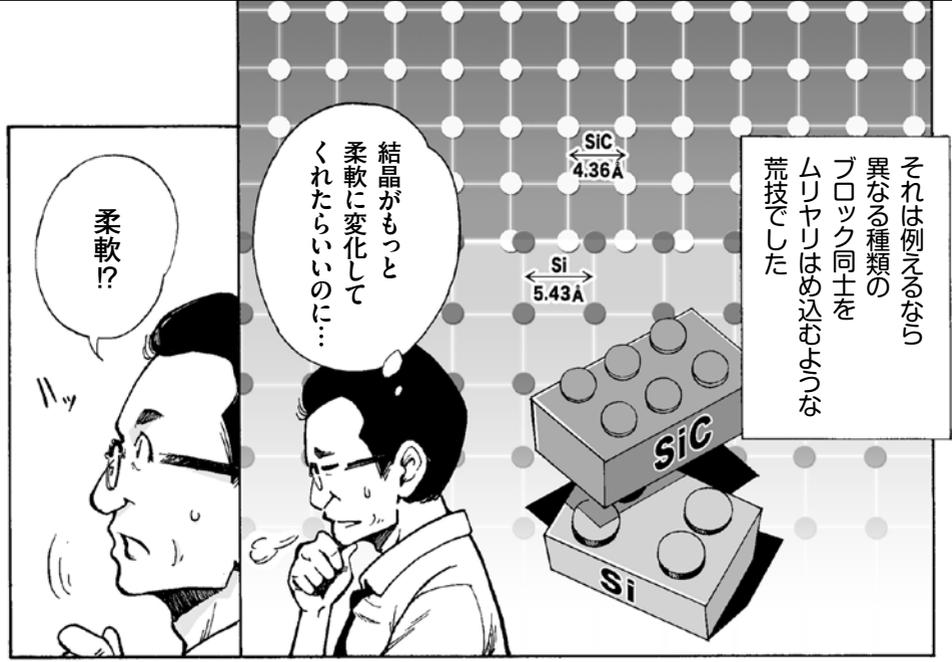
分野は違いますが
先生の研究は
非常に興味深い!



はい…

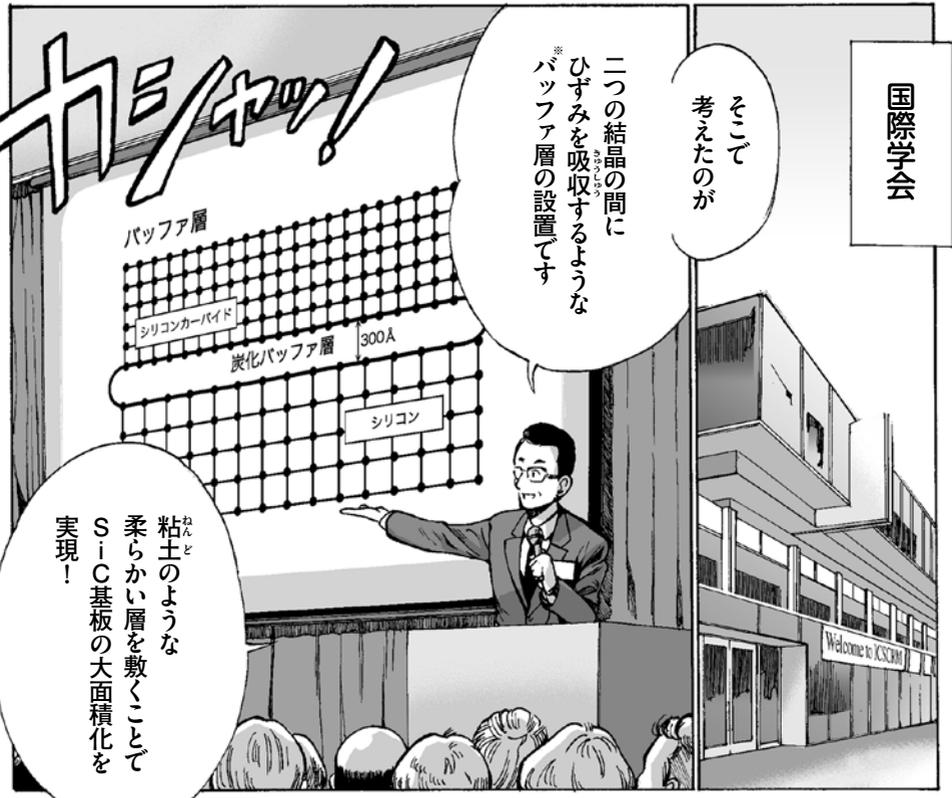


SiCのエレクトロニクス
応用のさらなる発展に
お互い尽力しましょう!!



それは例えるなら
異なる種類の
ブロック同士を
ムリヤリはめ込むような
荒技でした

※バフファ層 — バフファとはある二つものや状態の差を緩和させるためのもので、
本文では異なる結晶周期構造の差を緩和させる目的で導入する層という意味でつかわれている。



国際学会

二つの結晶の間に
ひずみを吸収するような
バフファ層の設置です

そこで
考えたのが

粘土のような
柔らかい層を敷くことで
SiC基板の大幅積化を
実現!



これは…?

うっかり普段とは違う角度に傾けて研磨してしまいました

通常なら廃棄してまずけど何か様子が違う気がして…

確かに…通常アチソンSiC基板の上にSiC薄膜を成長させるとひび割れのようなモザイクができる

しかし…



こんなに滑らかなSiCエピタキシャル結晶は見たことがない!!



まだこの段階ではSiC基板をトランジスタに使うには性能が不十分でした

その後 1987年 研究室では学生たちが研究テーマとしてアチソンSiC結晶を研磨し

その上に高品質なSiC薄膜をつくる作業をしていました

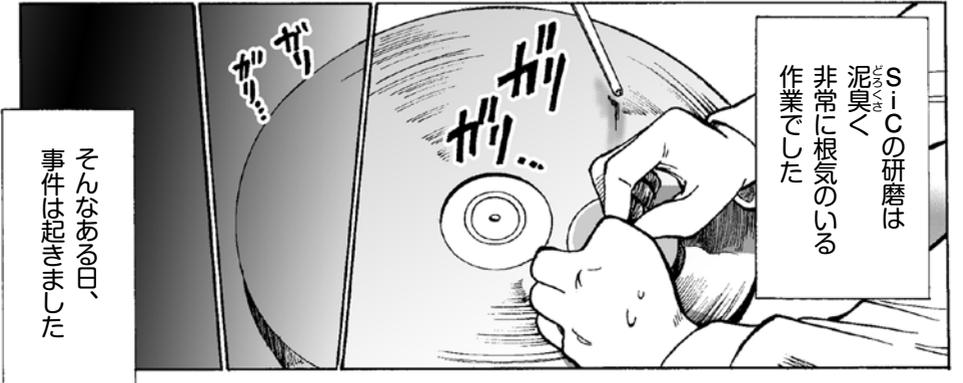


ああっ…もう研磨剤がダメになってしまった…

ダイヤモンド並みの硬さだもんね…いくつあっても足りない

コラ! 作業に集中しなさい!! 失敗したらどーすんの!!

はい すんません!!



SiCの研磨はどろくろく非常に根気のいる作業でした

そんなある日、事件は起きました

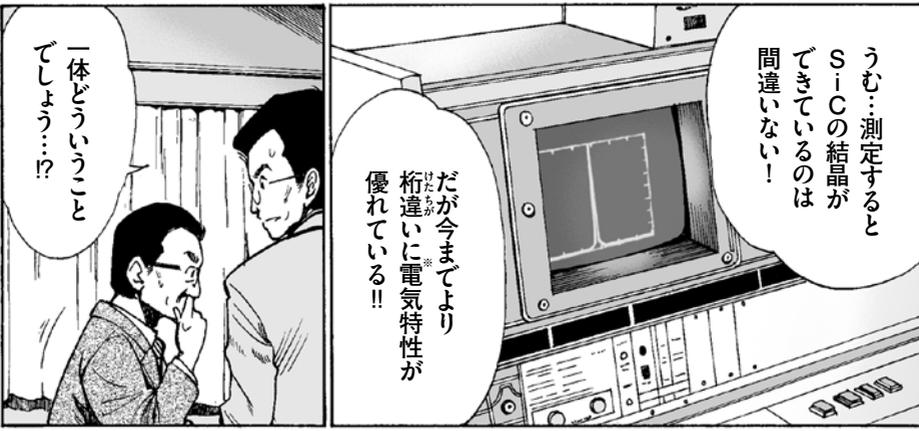
やった!



思ったとおり!
オフ基板にきれいな
SiC膜が
成長している!

数年後 よしやく
※^{こうかんかいのう}高分解能の電子顕微鏡で
計測するチャンスが
めぐってきて...

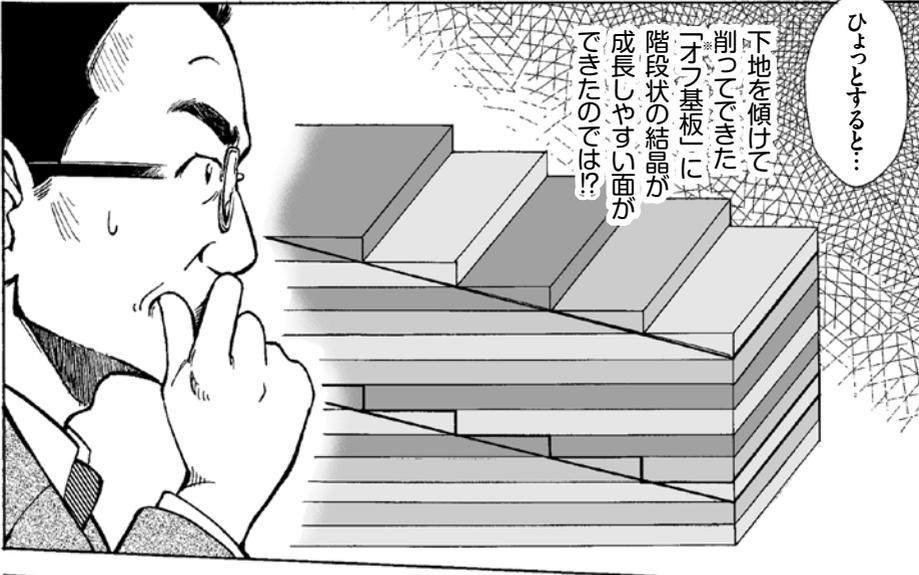
私たちの仮説は
証明されたのです!



うむ...測定すると
SiCの結晶が
できているのは
間違いない!

だが今までより
桁違いに電気特性が
優れている!!

一体どういうこと
でしょう...!?



ひよつとすると...

下地を傾けて
削ってきた
「オフ基板」に
階段状の結晶が
成長しやすい面が
できたのでは!?



しかしそれは
原子レベル
まさにナノメートルの
世界の話で

当時の研究室の
計測器では
それを確かめるのは
容易ではありませんでした

※電気特性 — 物質の持つ電磁気的な特徴のこと。
※オフ基板 — 通常の基板(ウエハ)とは別の角度でスライスした基板のこと。通常とは異なる周期構造が現れるため、新しい物性を得られることがある。
※ナノメートル — 10億分の1メートル。ナノは単位の接頭語で10億分の1という意味。
※高分解能 — 二つの点を区別して認識できる性能が分解能であり、より細かいものを認識できる性能を高分解能という。
※ステップ制御 — 多段階の状態や構造に対して制御すること。本文では、オフ基板が原子的に見て階段のような構造になっているが、これに合わせて結晶成長させることをステップ制御結晶成長と呼んでいる。



この手法を
「ステップ制御エビキタシー」
と命名しよう!!

そのSiCエビウエハを
元にして
1993年
私たちは
高周波に適した
※シヨットキー
バリアダイオードを
SiCで試作しました

※エビウエハ — 荒削りの下地膜を用意しておき、そこに高精度・高曲率のSiC膜を作り、品質を高めたエビウエハ。シリコンカーバイドなどはこれが採用されている。
※シヨットキー — ダイオードの二つで、金属と半導体を接合したもの。半導体と半導体を接合した通常のダイオードと比べ、いくつかの面で優れた性質を持つ。



よし！
これを持って
SiCデバイスの開発を
企業に提案するぞ！！

日本の産業発展に
役立てるんだ！！

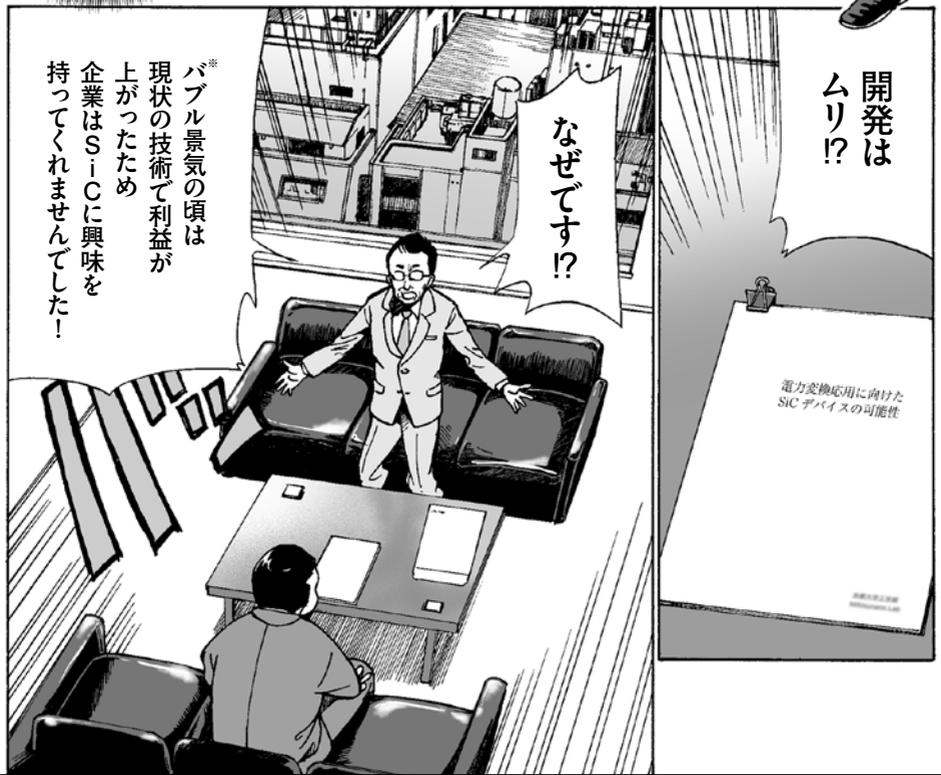


しかし今では
ドイツの老舗
総合企業である
シーメンスなど

海外の研究者たちは
これからは
SiCの時代だと
研究を進めているんです！！



今を逃すと
エネルギーを担う
重要な技術を
アメリカなど外国企業に
押さえられて
しまいますよ！！



開発は
ムリ！？

なぜです！？

※バブル景気の頃は
現状の技術で利益が
上がったため
企業はSiCに興味を
持ってくれませんでした！

電力変換応用に向けた
SiCデバイスの可能性

※バブル景気 日本で1986年から1991年に見られた好景気のこと。この1980年代に、日本の半導体産業は飛躍的に発展し、世界の市場に広まった。



その…バブルですよ…
バブル崩壊で
大不況となった今は
会社を維持するだけで
精一杯！



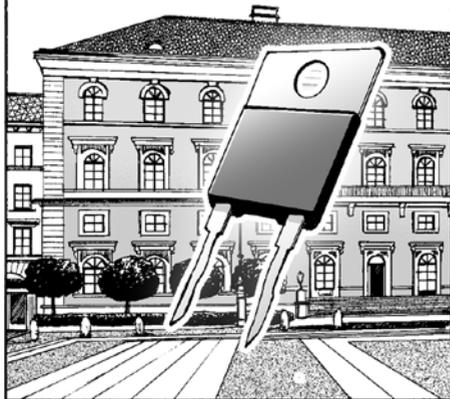
とてもSiCに
投資する余裕は
ないんです

申し訳ない…

※投資 将来的に利益を生み出す事業に、事前から資金をつぎ込んで育てること。

私たちの研究は
世界で認知される
ことになりました

1993～95年の
私たちの研究成果を元に
2001年に
シーメンス系の会社が
初めてSiCタイオードを
世に送り出しました



またアメリカのクリーン社が
1991年前後より
SiCウエハの販売を
始めています

それは私たちが
SiCエドワエハを
開発したのと同じ
1987年

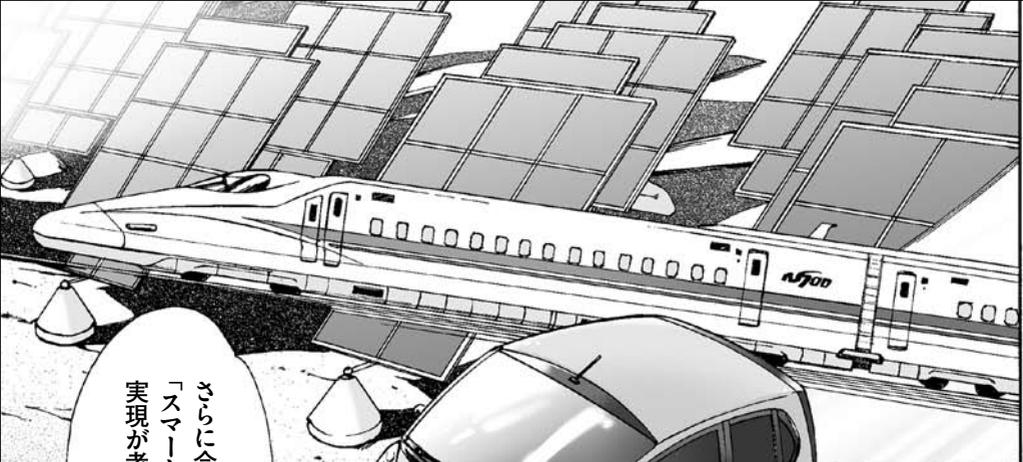
かつて学会で私の研究に
興味を持っていた
アメリカの
SiC研究者たちが
設立した会社でした

※フリーラン効果 ― (おもにマイナスの)結果が一定の時間を過ぎて、行為者に戻ってくる現象のこと。本文中では、日本で発明されたSiCの技術が海外で製品化され、日本のSiC産業にダメージを与えるという意味でつかわれている。

その後 ようやく
日本の企業もSiCの
重要性に気づいたんです

まさに
「フリーラン効果」

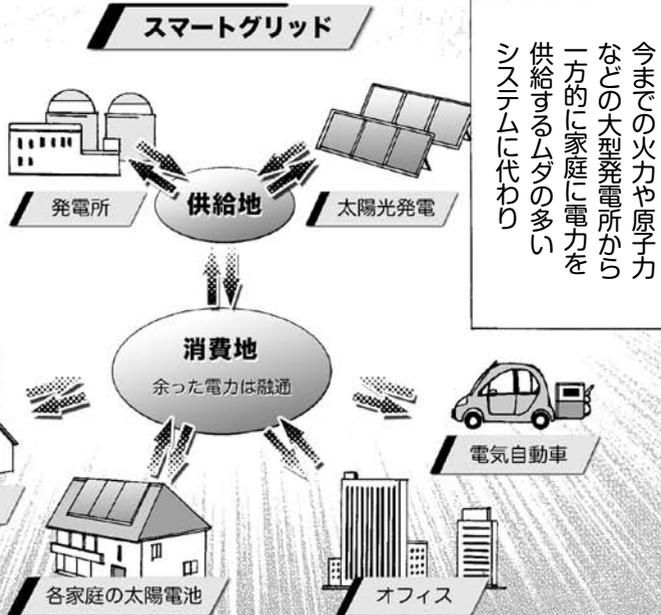
製品化では先を
越されてしまいました
が
まだまだ日本にも逆転の
余地はあるんですよ！



さらに今後は
「スマートグリッド」の
実現が考えられます

例えばSiCは
太陽電池の
電力変換だけでなく
日本が先行している
電気自動車などにも
利用されます

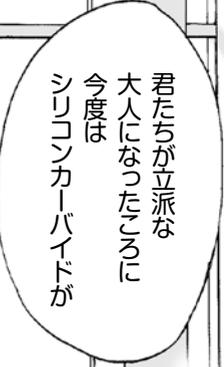
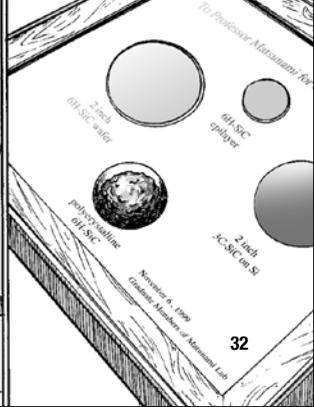
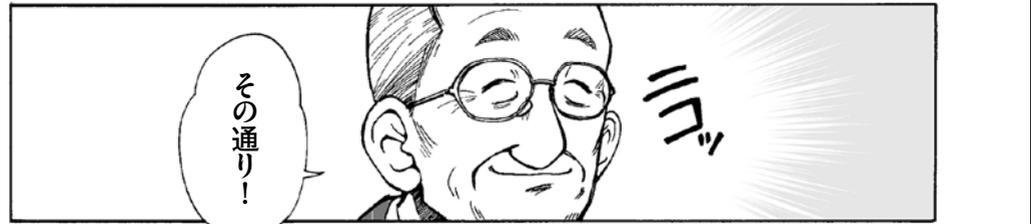
これらの普及には
SiCデバイスの
後押しが必要です



今までの火力や原子力
などの大型発電所から
一方的に家庭に電力を
供給するムダの多い
システムに代わり

家庭の太陽電池で発電し
余った電力を
それぞれ分け与えたり
電気自動車に充電したり
電力を融通することで

ムダなエネルギーを
節約するといつ
発想のことです



京都市マンガを活用した科学技術理解増進事業

マンガで知る! 京都の最先端科学技術

次世代の半導体材料——進化する省エネルギー技術!

平成22年3月 第1版発行

発行者 —— 京都市

企画制作 —— 京都市

財団法人京都高度技術研究所
京都精華大学 京都国際マンガミュージアム 事業推進室

監修 —— 松波弘之
(独立行政法人科学技術振興機構 JSTイノベーションプラザ京都 館長 京都大学 名誉教授)

編集 —— 京都精華大学 京都国際マンガミュージアム 事業推進室

作画 —— 榎 朗兆

脚本 —— サイエンス・グラフィックス株式会社

知的クラスター 創成事業とは?

「知的クラスター」とは、地域において、
大学や研究機関が持つ新しい技術を企業の製品化に応用するなど、
画期的な技術開発とそれに伴う新産業が次々と生み出されるシステムをいいます。
文部科学省では、このような「知的クラスター」を全国に生み出し、
地域経済の活性化を図ることを目的に「知的クラスター創成事業」を実施しています。
京都地域では、「京都環境ナノクラスター」として、京都市、京都府と大学、
産業界が一体となって最先端の研究を進めています。

具体的な研究開発テーマは?

京都には優れた研究を行う大学が集積し、ノーベル賞受賞者を多数輩出しています。また、家電製品や自動車などに使われる部品や材料で世界トップクラスのユニークな企業群が集積しています。
これらの強みを生かし、京都環境ナノクラスターでは、社会的関心の高い地球環境問題をナノテクノロジーの技術で解決するため、省資源や省エネルギーを実現する部品や材料の研究開発に取り組んでいます。

知的クラスター創成事業「京都環境ナノクラスター」

体制 ● 本部長 —— 堀場雅夫 (株式会社堀場製作所最高顧問)
● 事業総括 —— 市原達朗 (オムロン株式会社元副社長)
● 研究統括 —— 西本清一 (京都大学大学院工学研究科教授)

中核機関 財団法人京都高度技術研究所

参画機関 12大学、3機関、49企業 (平成21年度)

事業期間 平成20年9月～平成25年3月31日

研究テーマ ● 省エネルギー分野 (省電力デバイスの開発、超高効率光技術の開発)
● 新エネルギー分野 (燃料電池触媒開発、脱化石燃料開発)
● 産業資源分野 (省資源・代替材料の創成、新磁性材料の創成)
● 生活資源分野 (生活環境浄化技術の開発、機能性高分子材料の創成)
● スマートセンサ分野 (ポータブルモニタリングセンサの開発、環境評価センサの開発)

※くわしくは、<http://www.astem.or.jp/kyo-nano/>



進化する省エネルギー技術!

次世代の 半導体材料

京都市マンガを活用した科学技術理解増進事業
京都市産業観光局産業振興室