

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）中間評価に係るヒアリング
（低炭素社会創成に向けた炭素珪素（SiC）革新パワーエレクトロニクスの研究開発）

1. 日時 平成24年9月21日（金）15：55～16：45

2. 場所 中央合同庁舎4号館4階 共用第2特別会議室

3. 出席者

相澤 益男 総合科学技術会議議員

奥村 直樹 総合科学技術会議議員

今榮東洋子 総合科学技術会議議員

青木 玲子 総合科学技術会議議員

橋本 和仁 東京大学大学院工学系研究科教授（外部有識者）

岩本 光正 東京工業大学大学院理工学研究科教授（外部有識者）

小出 康夫 独立行政法人物質・材料研究機構環境エネルギー材料部門グループリーダー
（外部有識者）

小柳 光正 東北大学未来科学技術共同研究センター教授（外部有識者）

田原 修一 日本電気株式会社中央研究所支配人（外部有識者）

吉野 彰 旭化成株式会社フェロー（外部有識者）

中野 節 内閣府官房審議官（科学技術政策担当）

川本 憲一 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付参事官（最先端研究
開発支援プログラム担当）

4. 説明者

木本 恒暢 京都大学大学院工学研究科教授（中心研究者）

岡田 道哉 独立行政法人産業技術総合研究所イノベーション推進本部つくばイノベー
ションアリーナ推進部審議役（研究支援統括者）

奥村 元 独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター
センター長

5. 議事

【事務局】

それでは、これより研究課題、「低炭素社会創成に向けた炭素珪素（SiC）革新パワーエレクトロニクスの研究開発」についての中間評価に係るヒアリングを始めさせていただきたいと思えます。

本日の出席者は、お手元の座席表のとおりでございます。研究課題側からは中心研究者である木本先生初めお忙しい中、ご参集いただきましてありがとうございます。

また、本日の配付資料はお手元の一覧のとおりでございますが、ご確認をいただければと思えます。

このヒアリングにつきましては非公開で行いますが、後日、今後の研究発表、あるいは知的財産権等に支障が生じないことを確認した上で、議事の概要を公開させていただきます。

本日のヒアリングの時間配分につきましては、研究課題側からの説明を15分、質疑応答を35分とさせていただきます。説明に当たりましてはあらかじめお願いしておりますが、研究課題全体の研究の進捗度合いと目標達成見通しについて、国際的な優位性、サブテーマの役割、相互関係を含めて簡潔で明瞭なご説明をお願いできればと思えます。説明では、終了5分前に予鈴、終了時間に本鈴を鳴らさせていただきますので、時間が来ましたら説明の途中であっても中断していただければと思えます。質疑応答では終了3分前に予鈴を鳴らさせていただきます。

それでは、ご説明をよろしくお願いいたします。

【説明者】

京都大学の木本でございます。よろしくお願いいたします。

それでは、ご支援いただいておりますシリコンカーバイドのプログラムにつきまして、進捗状況を報告いたします。私どもがターゲットにしておりますのは、超高耐圧のシリコンカーバイドを用いたバイポーラ型のデバイスでございます。応用としましては、主に電力インフラです。高圧の直流送電、あるいは50Hz、60Hzの周波数変換、あるいは将来の高速車両等に应用できます。現在はこういうところで直流から交流への変換時等に約10%のエネルギーを熱として捨てている。その限界に挑戦するというものです。このロスはこのシリコンの半導体素子の限界、すなわち耐圧の限界、高温動作の限界でございます。そこで新しい材料でありますシリコンカーバイドの半導体を用いてこれを突破する。

例えば、家庭内では100Vですけれども、一步出ますと6600Vの配電系統というものがあ

ります。この電気を変換するには現在数 k V のシリコンのサイリスターを多段に積むという
ことでやっておりますが、非常に大きなエネルギーロスを出している。それを例えば 13 k V の
耐圧を持つシリコンカーバイドの素子を実現するというものです。

出口イメージを 2 つほど紹介いたします。1 つ目は将来のインテリジェント電力ネットワー
クであります。これを構築する上で、シリコンカーバイドの超高耐圧の低損失素子はキーデバ
イスになります。太陽光発電、風力発電等の効率的利用、故障の検出とそれを高速に遮断する、
あるいはハイブリッド車等との連携等を行う上で、この高耐圧のシリコンカーバイドの素子が
なくてはならない素子になると考えております。

もう 1 つの例が高圧の直流送電です。こういう変電所では 250 k V という大変高い電圧の電
気を変換します。その変電所の概要はこの写真のとおりでございます、莫大な機器、そして
冷却装置ということになっております。これを 10 k V 超級のシリコンカーバイドの素子を適用
することによって、体積、あるいは電力損失を大幅に低減できるというメリットがございます。

具体的な研究開発目標でございますが、13 k V の耐圧、20 A 級のシリコンカーバイドの I G
B T と言われるトランジスタ。そして、ダイオードの実現。そしてそれをシリコンではできな
い 250°C の高温で、5000 V のスイッチング動作を実証する。これらを支える材料科学、デバイ
ス物理等の学理を追求するというのが本プログラムの目的であります。

体制を下に書かせていただいております。まず 1 つ目はこのような高耐圧の素子をつくる上
で鍵を握る結晶です。この結晶をつくるエピ成長グループ、そしてそのウェハを受けて高度な
プロセスを一貫させてデバイスの実現とスイッチング動作を示すデバイスグループ、そしてそ
れぞれの基礎基盤を支えるアカデミアからなる基礎研究グループという 3 つのグループでなっ
ております。これから紹介させていただきます成果につきましては、ほとんどすべての成果につ
きまして少なくとも 2 つのグループが連携した成果となっております。

具体的な研究課題でございますが、材料の課題、デバイスの課題、実装回路の課題とござい
ます。特に、材料、デバイスの課題につきましては、シリコンカーバイドとして最も難易度の
高いものをターゲットにしております。こちらに最終的に実現したいと考えておりますダイオ
ードとトランジスタの構造の模式図を示しておりますけれども、この 10 k V 超級ということに
なりますと、シリコンカーバイドといえども容易ではございません。現在、世の中でめどが立
っておりますのは 1 k V です。桁違いに高い電圧が必要。そうするとこの部分、耐圧維持層の
厚さが 10 倍以上厚い結晶が必要。かつその部分の純度が 10 倍よくないといけない。単純に申し
ますとそういう課題がございます。

そして、さらに高性能化ということになりますと、この部分の欠陥を減らすということが大変に重要で、究極の結晶が必要となってまいります。さらにデバイスプロセスという意味ではいろいろな構造の工夫やプロセスの高度化というものも必要であります。これらにつきまして、1つずつ主な結果につきまして紹介いたします。

まず、結晶です。すべての土台となる結晶をつくる技術であります。こちらは $21\mu\text{m}/\text{h}$ というスピードで $140\mu\text{m}$ の結晶を3インチ全面で均一に積むことができました。かつその結晶の欠陥が非常に少ないという結果でございます。これを達成するに至ったポイントをここに書かせてもらっていますが、極性がある、シリコン面とカーボン面があるのですけれども、そのシリコン面を利用する。ややカーボン過剰の条件を使う。成長温度をあえて少し低くする等の工夫をしました。その背後にある物理原理を解明しておりますが、ここではちょっと省略させていただきます。

これによりまして、従来よりも10倍以上厚い膜でかつ非常に高純度かつライフタイム、キャリア寿命が従来よりも随分長くてしかも非常に均一であるというウエハができつつあります。これはn型の場合です。半導体ですのでn型、p型両方必要です。p型のほうが実は今まで着手されていなかった。シリコンカーバイドは、p型はできますけれどもp型の制御というのが非常に難しいという問題がありました。

例えば、原料となりますTMAという原料が液体であるということから供給の不安定性等の問題がございました。そこをいろいろ工夫することによりまして、従来よりも約1桁、純度の高いレベルで制御性よくドーピングを制御できる。これは高純度のp型です。かつ濃度の高いたくさんアルミアクセプターを入れて、低抵抗をつくるというほうも努力いたしました。これは加速強化をいただいた事業の成果でありますけれども、従来のこのラインに比べまして、抵抗率、これは低いほうがいいんですけれども、今回、 10^{20} という非常に高密度のアルミをドーピングすることに成功しまして、従来に比べまして10分の1から、100分の1という低抵抗のp型を実現することに成功いたしました。

次が欠陥の低減です。ここは非常にポイントでありました。まずは転位の低減です。シリコンと違ってさまざまな転位があります。中でも基底面転位といわれる転位がこのバイポーラ型素子にとって致命的であるということがわかっております。低減のポイントはこちらでございまして、高温で 1800°C 程度という超高温なのですが、熱処理をいたしますとこの基底面転位が事実上無害の転位に変換されるという現象を見出しました。発見しました。これを利用することによりまして、この現象を使ってこの上にエピを積む、結晶をつくるということによりまし

てこの転位の密度を従来の10個から0.09個 cm^{-2} に減らすということに成功しました。これはどの程度かと言いますと、最終的には1 cm角で素子をつくる必要があります。そうすると10個ありますと、素子の中には必ず10個の致命的な欠陥を含むということになりますから、学会のデモとしてはいいですけども、それは絶対に使えない。必ず劣化するという問題がありますけれども、今回の研究によりまして、0.09という値になりましたので、1 cm角の素子をつくった場合に、ほとんどまず当たらないという結晶ができつつあるということです。

次が点欠陥です。先ほどは転位という大型の欠陥でしたが、こちらは点欠陥です。ライフタイムキラといわれる欠陥が炭素空孔であるということ突き止めました。この炭素空孔をなくす、低減ではなくて本当になくしてしまうという手法を2つ見出しました。1つは、炭素ですから外部から炭素を導入して、結晶に拡散する。あるいはもう1つは意外だったんですが、熱酸化をするとカーボンが放出されてバルク中に拡散して、カーボンの空孔を埋めるという方法です。この方法によりまして、いずれでも可能なのですが、欠陥の密度を10乗台、検出できないレベルまで落とすことができました。これは半導体としては異例の欠陥のレベルであると考えております。かつ表面だけではなくて、このカーボンの拡散を利用しまして、厚さが100 μm 、200 μm にわたってこの欠陥が全くないという結晶ができつつあるということです。

この結果、キャリアライフタイムが大幅に伸びました。従来は1 μs 、これは長いほうがいいのですが、1 μs という値が標準的でありましたが、こういう手法を用いることによって現在は30 μs を超えるというライフタイムを達成いたしました。さらに電子線照射を行うということによって、ライフタイム制御を初めてn型、p型両方可能ですということも示しました。

実際にこの結果が素子のデバイスの性能にどれだけ効くのか、本当に有効なのかということを示したのがこちらであります。これは10 kV超級のPiN型のダイオードのオン電圧の改善です。これは100 A / cm^2 流すのに必要なオン電圧でして、これは素子の損失に直結します。低いほうがいいわけですが、従来のプロセスですと、非常に高くてかつばらつく。しかし、こういうライフタイム改善の手法を用いることによって、その値が小さくなり、ばらつきが小さい。これは室温の結果ですが、その効果は高音ほど顕著でありまして、150°Cになりますとその差は非常に大きいということを確認いたしました。これはバイポーラ素子を作製する上で根幹となる技術であると考えています。

ダイオードの続きでありますけれども、高耐圧化、これは結晶だけをつくっても高耐圧は得られません。理論耐圧を得るためには、電界集中を緩和しないとイケません。それに対しまし

て、独自の少ないイオン注入の回数で徐々に濃度勾配をつけるという方法を用いることによって21 k Vを超える半導体として最高の耐圧を達成しまして、幾つかのメディアで報道していただきました。

これは原理実証の、非常に小さい1 mm角程度の素子です。しかし、現実には20 Aという目標を掲げております。そうすると大きい素子でそれができるのですかということですが、こちらは8 mm角まで大きくしまして、8 mm角の素子において20 Aを達成しました。もう少し頑張れば30か40 Aいけます。かつ耐圧のほうも12.8 k Vでリーク電流が少ないということで、当初の目標の13 k V、20 A級を達成しつつあるということです。

最後は、I G B Tです。これは非常に難しい素子ですけれども、こちらに幾つかの工夫を書いております。1つは、シミュレーションを元にここに電荷蓄積層を設ける。このp C S Lと書いてあるところです。ここを工夫しました。これを用いることによって、オン電圧を低減する。あとpチャネルのMOSを改善する。シリコンの場合には、CMOSが進んでおりますので当然なのですが、シリコンカーバイドではCMOSの技術がほとんどありませんので、pチャネルというのはゼロからのスタートでした。

例えば、ドライ酸化でpチャネルMOSを作りますと、移動度が0.1出ない、動かない。それを、プロセスを工夫することによって14まで上げた。これも世界最高レベルです。この結果、10 k V級のI G B Tが動作しました。室温での特性はまだ改善が必要ですが、高温200°Cでは非常に3 Vから急激に立ち上がるという特性が得られまして、耐圧も10 k Vを超えてまいりました。これは世界第2位の特性です。

絶縁封止のほうも頑張っておりまして、ちょっと詳細を省きますけれども、250°Cで20 k Vに耐えるという絶縁封止、パッケージングの技術も同時並行で進んでおります。こちらが全体の計画と進捗状況です。基盤グループ、エピグループ、デバイスグループにつきまして、当初の予定どおりほぼ進んでおります。震災による遅延の影響がありましたけれども、努力によって改善し、現在は一部前倒しの状況であるということです。赤字が達成した部分であります。

パテントにつきまして、少し厳しいご意見をいただきましたけれども、この分野はもう40年以上の実績が我が国にはありまして、実は10年ぐらい前に基本的に特許は本グループでほとんど押さえてしまっているという状況です。こちらがパテントのマップですけれども、もう日本は圧倒的に全体の50から60%を占めております。

ランキングを見ましても、本グループのメンバーが上位に来ていて、ほかの機関の競合相手というのは、ここかというあたりでありまして、もちろん努力はいたしますけれども、特許に

において、負けるということはないと考えております。

これが国際的なベンチマークであります。米国、欧州、韓国・中国、本拠点でありますけれども、高速エピ成長、欠陥低減、ライフタイム、デバイス耐圧では間違いなく世界トップであります。IGBTにつきましては、米国と一騎打ちの状況になっておりますけれども、急ピッチで米国を射程内においているという状況です。

最後にあと1年半で勝負目論見があるかということなのですが、こちらが勝つための秘策の1つであります。先ほど申し上げた低抵抗のp型のエピ層を持ってきます。よそではできない高品質の結晶をここに持ってきます。先ほど申し上げました電荷蓄積層をここに持ってきます。さらにチャンネルの部分に本グループが特許を押さえておりますIEMOS構造を用いてチャンネル移動度をよそではできない高移動度を持ってくるということで、当初の目的であります13kVの20A。米国に勝つ素子をできるというふうに考えております。以上で発表を終わらせてもらいます。よろしくお願いいたします。

【事務局】

どうもありがとうございました。

それでは、これより質疑応答のほうに移りたいと思います。ここからの進行については奥村先生のほうでよろしくお願いいたします。

【有識者議員】

それでは、ご説明大変ありがとうございます。大変チャレンジングな目標に目標設定されて進められているという様子、また進捗も大分よくわかってきたのではないかと感じております。最初にちょっと細かいことを聞くのですが、結局IGBTの最終目標の耐圧とそれから電流の20A、これに対して今どこにいるのかということをもう一度ちょっとPINのほうはよろしいんですが、IGBTのほうについてももう少し。

【説明者】

耐圧が10kVで、電流のほうは0.1A。

【有識者議員】

そのレベルですね。それで20Aですね。ですから、私は何かえらい遠いなと見ているんです

が、最後の絵でご説明されたのだと思いますが、この距離感が最後のご説明では私にはわかりにくい。それをお願いしたいということが1点。それから事前にも出ていたこの特許の件で、今もご説明があったのですが、やはり13 k Vの20 Aという非常にレベルの高い極限的な世界に今チャレンジングされているので、この世界になるとやはりこの分野特有の特許があるだろうと思います。先ほど示されたこの特許マップの特許はそれ以外のS i C全面にわたっての恐らく特許です。

チャレンジング性があるからこそある意味ではF I R S Tに採用されているわけで、ですから高性能I G B Tという世界を切り拓く特許を最後の段階では出していたかかないと、このマップではこのプログラムの意味は出てこない。これは民間企業のどことどこが、三菱と東芝がたくさん出していますというのでは、それでは国費を投入した意味が出ませんので、特許については今一度お考え直していただきたいと思います。ご意見があれば言っていただきたい。とりあえずその2件を。

【説明者】

このI G B Tのほうにつきましては、現在0.1 Aというのは、まずは確実に動くということで素子をつくりました。震災の影響で非常に遅れてしましまして、何とか最初のI G B Tで動かしたいということで、まずは1 mm角、あるいはそれよりも小さめのチップで間違いなく耐圧が出ますと、かつ電流値を得るためには、ここでいう面積あたりの抵抗がいくら小さいかということを見て、シミュレーションに合っているかどうかということを確認したいということで、昨年度から頑張りまして、今年の春ぐらいにこの特性が出たという状況です。

この特性は、大体予想通りでして、ですからこれで小さい素子だったら間違いなくできるというところまで来ました。あとは20 Aを得るためには、これを先ほどのP i Nのダイオードと同じように、8 mm角というような素子で作らないといけません。そこはもちろんハードルはあるのですが、これで大体シミュレーション通りに行けたということになりますと、あとはもう学術的に非常に大きなバリアというのは恐らくなくて、プロセスを高度化することで行ける。ただ、それだけでは不十分だと思いますので、こういう独自の構造を設けることによって、オン抵抗自体を極限的に下げた特性を得る。20 Aというだけではなくて、20 Aをどれだけ低い損失で得るかということに目標をシフトしているという状況でございます。

特許につきましては、ご指摘のとおりで、非常に真摯に受け止めたいと思います。例えばライフタイムキラーを低減する。カーボンの空孔を無くす、今日紹介させていただきました致命

的な転位でありますこの基底面転位を、変換現象を利用して無くす。このあたりは基本特許になると考えまして特許出願しています。ですからこういう種類の出願を構造も含めて積極的に出す必要があるというご指摘だと思います。その通りだと思いますので、頑張りたいと思います。

【有識者議員】

それぞれの目標値を定めて、それを次々と達成していかれると、これは素晴らしい展開を示していると評価できると思います。

そこで伺わせていただきたいのは、今、奥村議員からの質問もありましたところですが、20ページの国際ベンチマークの表です。ご説明でもちょうどそれぞれ評価項目に該当するプロセスというのか、その部分をそれぞれこういう形で達成してきたとされています。それでこの拠点での達成度というものは、これを全て相対的に取り込んで、その結果がこの I G B T の性能というところになっているのか、その I G B T は先ほどのように極限状態を一応想定して進めてこられて、表に上がっている数値を総動員すれば、それだけでもさらに向上するのか。この辺はいかがでしょうか。

【説明者】

ご指摘の通りでございまして、先ほど結晶のスピード、欠陥の密度とかいういろいろな項目を挙げておりました。それは全て最後には結晶の技術、あるいはデバイスの技術が最後この高性能 I G B T のところにつながっていく。どれだけ純度のいい欠陥の少ない結晶ができるんですかと。個別の素子でどれだけの高圧が出るんですかと。そういうことが1つ1つ全て最後は I G B T をつくる上での1つずつの構成要素、基本的な技術になってまいります。今は、その基本技術はほぼ揃ってきたと。単なるデモンストレーションではなくて、信頼性も含めて恐らく行けそうだというぐらいの結晶ができてきた。あとは独自の構造も含めて、I G B T の作製にこれから1年半で向かうわけですけれども、現在の状況というのは得られた先ほどの全ての項目を集約した上で作った特性がこれというわけでは現在は必ずしもなくて、まずは作るのにやはり半年ぐらい、3カ月ぐらいはかかりますから、少し前の設計の技術レベルを想定した上で作ったのが、現在このレベルです。ですから、今後、上の欠陥が少ない、あるいは寿命が長いというウェハを使う、あるいは他のプロセスを高度化することによって、ここが一気に上がる、性能が上がっていくというふうに期待しております。

【有識者議員】

そのことによって、先ほどの、このところで5 Aか、あるいはもうちょっとかというところが達成されるという、そういう構想で考えておられますか。

【説明者】

実は、20 Aというのは、それほど大きなバリアではないと考えています。P i Nダイオードも最初作ったときには0.1 A級、それを結果の少ないウェハさえあれば、うまくプロセスすれば大きいものは作っていける。会社での量産ということになるとまた別だと思えるのですけれども、多数個のチップを再現性よく作るというレベルでしたら、現状のレベルプラスこの技術を総合すれば20 A級というのは、20倍の、ここでは数字の違いがありますがけれども、20倍の技術のレベルの差があるというわけではございません。

【有識者議員】

そういたしますと、先ほど特許の件で奥村議員が指摘された I G B Tの最終的なデバイス化のところで、基本的な特許が出るということはそういう意味では難しいのでしょうか。

【説明者】

もちろんそういう独自の構造でとるということをもちろん目指したいと思います。あとデバイスだけではなくて、最後はデバイス単体でなくて、やはりシステムとしてとるとというのがベストだと思いますので、もう少し応用も含めた上で、例えば回路とか実装という面だとれるとベストだと思いますので、そういう方向で頑張りたいと思います。

【外部有識者】

今のことに関連して、ずっとそこが気になっているのですが、先生はずっと以前からこの分野のトップを走っておられていて、こういうテーマ、目標に対してきちんと超えられていて、そういう意味で着実に来られているのは大変素晴らしいと思うのですが、シリコンカーバイドのパワー半導体に関して言われていて、ずっと我々が懸念してきたのは、確かに特許もたくさんある、それから研究もされている、だけど現実を見たときに、シリコンカーバイドのウェハを買おうと思ったら、アメリカ製ばかりだよとか。それで、このままで行って、本当

に勝てるのかということがあって、ここで我が国として結構投資をしようという中で、先生にリーダーをしていただけてやろうという、ここがこう言ったからといってそれで本当に日本がビジネスの世界でもきちんと押さえられるのかどうかという戦略はどうも別なのではないかという議論もあって、それでこういう集中的に先生にリーダーをやっていただいて、いろいろな関連のあるところもまとめて知恵の総計をとって、ビジネスにも勝っていただくような、そういうような成果を出していただくという、こういう採り方だった。先生のご提案もそうだったと思います。そういうふうに見たときに、今のこのアプローチでそういうところに達せられるような、そういうことになっているのでしょうか。あるいはそうするための工夫はどのように入っているのでしょうか。各研究項目だけではなくて、最終的なビジネスとして。

【説明者】

一番懸念されましたのがウェハの入手だと思います。一番最初に提案させていただいたときには入っておったのですけれども、このプログラム、少し規模が縮小されたときに、本プログラムでは学術的にも技術的にも難しいところに絞るということでこの提案をさせていただきました。

そこで片手落ちではないかというふうにご指摘を受ける可能性がもちろんあるのですけれども、その間に幸いにして産業界が頑張ってくれまして、昔のように米国の1社からしか入手できないという状況は完全に崩れまして、日本だけではないのですけれども、米国のC社よりも品質のいいウェハをつくるメーカーが複数出てまいりました。ですから、日本のメーカーを含めまして、ウェハの入手というのはほとんど問題ではありませんで、そのコストも急激に下がっているという状況です。

【外部有識者】

そうするとこのデバイスに向けた各物性を上げていくという、これの延長上に最終的なパワー半導体デバイスの世界で、容易に追いつかれない、知財でとるのかノウハウでとるのか、その辺の戦略を伺っているつもりなのですけれども。

【説明者】

全てで勝ちたいとは思っているのですけれども、議論しておりますのは特許、あるいは技術でももちろん勝つと。でもそれだけでは不十分で、最後はどういうシステムを構築してどういうビジ

ネスで展開するのか。

【外部有識者】

それを今どういうふうにアプローチされているのですか。どういうふうに今後アプローチできるのですか。

【説明者】

この最先端プログラムの中では必ずしもないのですけれども、連携ということで、産総研、つくばのほうで、今、シリコンカーバイドのパワーエレクトロニクスの民活共同体というものを立ち上げさせてもらいまして、TPECというのですけれども、その中でこういう部門で本当に事業をするという企業さんが今、十数社集まりつつあります。その中で幾つかの企業さんが例えばこういう超高耐圧の素子をプログラムの後も継承して事業化に発展させていきたいと。

【外部有識者】

そこがもう少しきれいに出てくるのかなと思ったのです。つくばイノベーションアリーナのことを言っておられる、つくばのあれですよ、そこの。それとの関係は、これはどうなっているのですか。5ページ目の絵で見てもいいと思うのですけれども。

【説明者】

お答えさせていただきます。今、つくばの中で、つくばイノベーションアリーナというある種の拠点を作ろうという動きがありますけれども、その中でパワーエレクトロニクスというのが1つのコアの技術領域として設定していただいています。その中では最先端研究開発支援プログラムも走らせておりますし、ほかにも幾つかの大きなプロジェクトが並行して走っております。そういうものがどちらかと言うと、ナショナルプロジェクトとしてある種の技術を確立するところなのですが、その先の事業化というところを本当に視野に入れるためには、ここでできた技術を本当に確実に、歩留まりと言うとちょっと言い過ぎかもしれませんが、確実につくれる技術というふうに仕上げる必要があります。よく「死の谷」と言われる部分です。それを克服するためにこの新しくTPECという組織を作りまして、Tsukuba Power-Electronics Constellationsという、民活型の共同研究の連合体とさせていただいていいかと思えます。そういうところから企業さんに参画いただいて、製品に近いところまでを仕上げる。

ある意味企業さんから言いますと、そこへの投資判断ができるところまでをつくばでやって、投資判断ができた段階で、これはもう引き取っていただいて、産業界で本格的に事業で……。

【外部有識者】

木本先生のプロジェクトとそことの関係はどういうふうになっているのですか。

【説明者】

ここでできた技術を終了後に……。

【外部有識者】

終了後に移すのですか。

【説明者】

ええ、移して。途中で移せるものは移していければと思っておりますけれども、そういうところで本当に「死の谷」を越える部分を民活型の企業さんとの共同研究でやって、本当の事業化につなげるというシナリオを実は描いております。

【外部有識者】

3年前のご提案のとき、そういう提案だったかどうかははっきり覚えていませんけれども、イメージとしては、私はT I A、つくばイノベーションアリーナの中で、大きなこういのが走るメインがあって、その中核をなすものとしてこれがあるという位置づけを私自身はちょっと誤解だったのかもわからないですけれども、していたのですけれども、そうですよね、これね、もともとね。そうでもなかった。そことの関係、要するに、連携がちゃんとできて、ここで成果がきちんとトランスファーされる、あるいはそことの連携がうまくできているかどうかをちょっと今判断したいので、それで伺っています。

【説明者】

最先端で得られた成果というのは、特にデバイス関係というのはつくばのT I Aを中心としたグループに、もちろん契約は必要ですけれども、どんどん技術移転するという、そういう仕組みになっております。例えば、ここにデバイスグループには産総研さんが中心になっていま

すけれども、こういう高耐圧の素子、将来の事業化に非常に興味を持っておられて、具体的にどういう電力システムを作るかということも議論されている企業さんがこのあたりに入っておられまして、実際に産総研さんの中で、研究員の方が I G B T の研究開発をされているという状況です。ですから、その成果というのは、このプログラムの終了後に会社に持って帰られて、将来事業化に結びつくものであると考えております。

【外部有識者】

ちょっと技術的な質問をさせていただきたいのですが、 I G B T の性能の最終目標値が 20 A と現在は 0.1 A と、先ほど質問ありましたが、現代の I G B T は p チャンネルですよ。

【説明者】

はい、そうです。

【外部有識者】

将来は、 p チャンネルだと上がらないので、最終的には n チャンネルにしたいというお話だと思うんですよ。シミュレーションでクリアできるというお話なんですけれども、電流を 0.1 から 20 に増やせる内訳というのは、 1 つは、 n チャンネルになるので、チャンネルモビリティが今は 40 ぐらいですか。 14 だったのが、 n チャンネルにして 40 ぐらいにして、大体 3 倍ぐらいをそれで稼ぐと。それから、あとはオン抵抗ですか。オン抵抗を 20 幾つから 5 ぐらいにして、それで残り 4 倍ぐらいですか。両方かけて大体 10 倍以上の電流改善が見込めるでしょうと。そういう見込みでよろしいですか。

【説明者】

チャンネル移動度の増分というのはオン抵抗に直結しますので、具体的にはオン抵抗が 25 から 5 とか 8 とかになるというところが一番大きくて、そこの何倍でしょうか。 4、 5 倍というところで電流を稼げるというのが大きいところです。あとはもう一番大きいのはチップサイズの問題です。チップサイズはもう桁違いに大きくしないと 20 A はとれません。

【外部有識者】

これはどこで決まるかだと思うのですが、やはりチャンネル電流は移動度に比例しますので、

移動度、先ほど言いました3倍というのは、このオン抵抗の現象に入っちゃっているんですか。

【説明者】

入っています。ここのチャンネルの抵抗というのは、結局この縦軸の微分オン抵抗というのはエミッターからコレクターまでのすべての直列抵抗の和になりますので、チャンネル抵抗が上がる、チャンネルの移動度が上がるというのは、チャンネルの抵抗が下がるということになります。ですから、チャンネル移動が横軸になっておりますのは、チャンネル移動度が上がれば上がるほど、チャンネル抵抗が下がるので全体のオン抵抗は下がっていきますと、そういう図になります。

【外部有識者】

通常オン抵抗というのは、電圧の低いところで測る抵抗をオン抵抗と言いますよね。実際には電圧をかけますので、その状態では飽和特性を示したりして、実際の電流値はまた別ですよ。そこに実際の電流値のところにはモビリティも入ってくるわけですよ。両方効くのかなと思っていたのですけれども。

【説明者】

飽和デバイスの場合には、原点付近、立ち上がりのところでオンをとりますので、そのチャンネルの……。

【外部有識者】

チャンネルのモビリティはこっちのほうに入っちゃっている。

【説明者】

オン抵抗の中に入っちゃいます。

【外部有識者】

そうすると10倍はいかないわけですね。

【説明者】

性能という意味では10倍はいかないです。

【外部有識者】

20倍いかないとダメだと思うのですけれども、これだと20倍いかないので、残りはどこで稼ぐつもりで。

【説明者】

チップサイズです。今は数百 μ のサイズのものを8mm角と。

【外部有識者】

ただサイズを大きくして電力を稼ぐというのは、今でもそのまま大きくすればいくらでもできるので、単位面積あたりの電流で本当は見ないとダメかなという気がするのですけれどもね。

【説明者】

単位面積あたりの電流というのは、大体100A/cm²というのが大体もう限界として、限界ではありませんけれども典型的な値としてございます。それを1000A/cm²というのは流すのは可能ですけれども、その値を使って実用化するというのはパッケージ等の問題もございまして、それは非常に難しいことになります。チップサイズがやはり大事です。

【有識者議員】

田原さん。

【外部有識者】

2つ教えてください。1つはベンチマークで未着手とおっしゃっている高温スイッチング特性の見通しというのを教えてください。もう1つは、このプロジェクト自体は大変ハイエンドの目標を達成しようということで、着実に進められていると思うのですが、例えばもう少し電圧の低いところにボリュームゾーンの市場があったりするのではないかとと思います。これから電池などのアプリケーションを考えると、この技術は、例えばもう少し電圧の低い領域において、例えば、低コスト化ということなどで、コントリビューションできたりしないのでしょうか。そのためにはもっと違った成果、例えば、結晶欠陥はさらに2桁ぐらい下げるとか、が重要になったりしないのでしょうか？ボリュームゾーンへの貢献という観点でコメントをいた

だけだと思います。

【説明者】

まず、1点目ですけれども、高温スイッチが未着手になっております。この理由は、まず250℃で数千Vで数十Aのスイッチングを測定する装置が世の中に存在しなかった。それが大きな理由です。ですから、ここは何もしていないということではなくて、そういう高温で高電圧かつ大電流のスイッチング特性を測る装置をまず開発していたという状況です。その装置は開発が完了いたしました。ここには書いておりませんが、ですから、計測の環境は整いました。後はそれに耐える素子を作ることになるんですけれども、少なくともダイオードにつきましてはもう可能です。

あとは先ほどから議論になっております数十A、20A級のIGBTをつくることが実現できればすぐにそちらの高温のスイッチング装置のほうに持って行って、そのスイッチング動作を調べていきたいと考えております。

後半のほうのご質問ですけれども、ご指摘のとおりでございまして、これはハイエンドの目標ですけれども、ここから派生したいろいろな結晶、デバイスの技術を1kV級、あるいは3kV級の素子に展開するという事は考えております。例えばですけれども、こちらの基底面転位の密度が従来に比べて桁違いに下がったと。これは従来1kV級の例えばPOWER-MOS-FET、あるいは一部ではショットキーとpn接合を並列にしたMPSというダイオードもあるんですけれども、そういう素子の場合にある状況では実は劣化が起こるということが一部で問題になっております。それが歩留まりを下げるとかいう問題があるので、こういう結晶を作る技術を展開することによって、そういう1kV級の素子でも劣化の全くない素子を高い歩留まりで作るということに貢献できると思います。

【有識者議員】

1つだけ伺いたいのですけれども、このプロジェクトは歩留まりのことまでお約束いただけてないのですけれども、これだけ耐圧を確保するにはいろいろな努力がいるわけです。結晶欠陥からその上のエピやデバイス構造から、それで耐圧が確保できているので、当然電流確保するためにチップサイズを大きくしますと、歩留まりが低下することが予想されるわけです。安定して13kV、20Aを何ミリかは知りませんが、チップサイズである程度以上の歩留まりがないと、先ほどのこの後に民間が扱う仕組みがあると言われても、なかなか使いきれ

ないと思うのです。

公式なお約束はされていないのですけれども、歩留まり、I G B T、13 k V、20 A、これはどのくらいのイメージ感で持っておられるか、もし何かお考えがあれば、あと1年半しかないんですけれども。教えていただくとありがたいですが。いかがでございましょうか。

【説明者】

非常に難しいご質問ですけれども、例えばチップサイズが3 mm角ぐらいですと、それはもう非常に高い歩留まりが。

【有識者議員】

チップサイズではなくて要するに13 k V、20 Aという機能の特性で、どのくらいの歩留まりになるか。

【説明者】

少なくとも1個できましたというので満足するつもりはございません。ただ、それが80%というところで行きますと、これはなかなか難しいだろうと思います。恐らく10%とか20%、それぐらいを何となくイメージしておりますけれども、それを80%にするのに実はつくばでこの先、先ほど申し上げたT P E Cというところでやって、そこで企業さんが投資判断ができればいわゆるそこまでの歩留まりがあればできるという判断ができるでしょうから、あとは企業さんに移していくという戦略です。

【有識者議員】

そういうことを、内々にお話を始めておいていただきたい。このプロジェクトからどう将来につながるかというときに、やはり受け取り側の期待水準があるわけですから。そういうことはプロジェクト外の話で、お約束になってないですが、そういうこともぜひ円滑に展開するためにもつくばで進めていただきたいと思います。

【外部有識者】

個々テーマのターゲットバリューを設定して、その値も全てクリアしてこられており、各チーム間でもエピ、デバイス、基礎物理の連携があつて非常にうまく進んでいると思います。私

の印象はちょっと違っていています。最後の21ページのこのシミュレーションについて質問致します。チャンネル移動度は従来のレベルであっても、このオン抵抗については、ライフタイムの値が成長させたエピ膜でも $1 \mu s$ が達成されていて、先生の技術を使えば $30 \mu s$ に伸びるということなので、微分オン抵抗はかなり下がっていく印象を持ちます。

しかももう1枚前のスライドでのベンチマークを示した表で、米国のデータと先生の赤を比べるとかなりの部分で、この2年ぐらいのところクリア、かなり打ち勝ってきています。私の印象からすると、これら数値を達成する技術やライフタイムを30倍ぐらい長くするという技術を使えば、13 kV、20 A というのはもしかしたらそんなに難しいターゲットバリューではなくて、米国の追随を許さない、抜きん出るような印象を持ちますが、いかがでしょうか。私はそういう印象を持ったのですけれども、逆に。

【説明者】

まさにそういうところを目指しておりますけれども、米国もずっとここで留まっておりませんので、ライフタイムの増大のプロセスも、欠陥の低減のプロセスも追々というか順番に学会発表しておりますから、それを真似て特性を上げてくる可能性はもちろんあります。単に技術の高度差だけではなくて、アイデアも含めて確実に勝てるというところを目指したいと思いません。

【外部有識者】

そうすると、やはり現時点でも13 kV、20 A というのはハードルの高い目標という印象でしょうか。

【説明者】

私はそれほど高いとは思っておりません。もうちょっと大きい面積で歩留まりをどのくらいと言われるとつらいと思えますけれども、1個だけできるというのではなくて、複数個そういうものができるというのは、多分あと何回か繰り返せば間違いなくできると私は思っています。

【説明者】

ちょっと一言よろしいですか。いわゆる要素技術をそれぞれ足して、要素の特性が出るかと言うと、トータルプロセスとして考えたときにやはり幾つか取り合いをとっていかないといけ

ない部分があります。コンパティビリティがあるかどうかというのが本当にデバイスとして仕上げる時のポイントになりますので、要素技術をすべて足した値がそのまま数字になるかと言うと、決してそういうことでは、特に本当に実用的な素子では、そういうことにはちょっとなりませんので、そこはちょっとご理解を。

【有識者議員】

あと1年半しかないですけれども、そのときも恐らく日本の電力事情は厳しいはずです。逆に言いますとそれだけこの技術に対する期待感というのはやはり大きいですから、最後おまとめになるとき、チャンピオンデータですとか、そういう表現にならないように、歩留まりの話は、安定してある程度できるとか、ぜひおまとめになるときのことをそういうことも考えて今から進めていただきたい。

あとはよろしゅうございましょうか。どうもご説明、ありがとうございました。

【事務局】

それでは、これでヒアリングを終了させていただきます。どうもありがとうございました。