



ヘテロジニアスイнтеグレーション
ロードマップ
2019年度版

第15章:マテリアルと
新たな研究マテリアル

<http://eps.ieee.org/hir>

HIR は、技術評価のみを目的として考案されており、個々の製品または機器に
関連する商業上の考慮事項とは無関係です。

このロードマップでは、元のソースから抜粋した資料および図の使用に感謝します。

図と表は、元のソースの許可を得てのみ再利用する必要があります。



第15章: マテリアルと新たな研究マテリアル

この章は準備中であり、2019年末に予定されているバージョン1.1のロードマップに統合されます。その代わりに、以下の要約と、現在の資料の現在の状態と新しい研究資料を示す一連のスライドと今後10~15年間で必要とされる進歩に関連するいくつかの情報があります。

エグゼクティブサマリー

マテリアルのセクションの焦点は、導体、半導体、絶縁体に幅広い特性を提供し、低コスト、低電力、高熱密度、高性能の要求を満たすことができるマテリアルの進化にあります。他のHIR TWGによって特定された要件に対処します。時間軸は、10年以内に生産される新しいマテリアルです。サプライチェーン要件は、サプライチェーンTWGとの共同作業に含まれます。

新たな研究マテリアルのセクションの焦点は、新しいデバイスタイプに必要なマテリアルの革命と、現在のデバイスアーキテクチャの導体、絶縁体、半導体、及び光学マテリアルを置き換えることができる破壊的な改善です。時間軸は、10年を超えて25年までの量産になる新しいマテリアルです。

この章の範囲は次のとおりです:

- 識別された困難な課題に対応するために必要な新しいマテリアルでHIRワーキンググループをサポートする。
- 量子コンピューティング、生物医学システム、フレキシブルエレクトロニクスなどの新しいデバイスの機能の破壊的な変化を、新しいマテリアルを通じて可能にします。
- 新規のマトリックスマテリアルとナノマテリアルを組み合わせた複合マテリアルの新しいクラスを通じて利用可能な特性の範囲を拡大します。

困難な課題を定義するには、このロードマップの内外で他のTWGと緊密に連携する必要があります。



Heterogeneous Integration Roadmap

Materials and Emerging Research Materials

TWGChair: Bill Bottoms



マテリアルと新たな研究マテリアルのスコープ



マテリアルのサブチャプタの焦点は、導体、半導体、絶縁体に幅広い特性を提供し、低コスト、低電力、高熱密度、高性能の要求を満たす材料の進化にあります。スコープは、他のHIR TWGsによって特定された要件に対処します。時間軸は、10年以内に生産される新しいマテリアルです。サプライチェーン要件は、サプライチェーンTWGとの共同作業に含まれます。


新たな研究マテリアルのサブチャプタの焦点は、新しいデバイスタイプに必要なマテリアルの革命と、現在のデバイスアーキテクチャの導体、絶縁体、半導体、光学マテリアルに取って代わる破壊的な改善です。タイムホライズンは、10年以降に量産を予定している新しいマテリアルです。

このチャプターのスコープ:

- ・ 識別された困難な課題に対応するために必要な新しいマテリアルでHIRワーキンググループをサポートする。
- ・ 量子コンピューティング、生物医学システム、フレキシブルエレクトロニクスなどの新しいデバイスの機能の破壊的な変化を、新しいマテリアルを通じて可能にします。
- ・ 新規のマトリックスマテリアルとナノマテリアルを組み合わせた複合マテリアルの新しいクラスを通じて利用可能な特性の範囲を拡大します。

難しい課題を定義するには、HIRの内外で他のTWGと緊密に連携する必要があります。





マテリアルによるヘテロジニアスイнтеグレーション

導電体

- ・ ナノマテリアル (CNT、グラフェン、ナノワイヤー)
- ・ 金属 (Cu、Al、W、Ag、Coなど)
- ・ コンポジット

誘電体







- ・ 酸化物
- ・ ポリマー
- ・ 多孔質マテリアル
- ・ コンポジット

半導体

- ・ 元素 (Si、Ge)
- ・ 化合物 (III-V, II-VI, tertiary)
- ・ ポリマ

マテリアルパラメータは、処理と操作のために互いに互換性がなければなりません:

- ✓ 費用
- ✓ CTE差分
- ✓ 熱伝導率
- ✓ 破壊靱性
- ✓ モジュラス
- ✓ 処理温度
- ✓ 界面接着
- ✓ 動作温度
- ✓ 破壊電界強度

難しいマテリアルの課題2019-2029 (1)

マテリアルと新しい研究マテリアルの困難な課題

困難な課題 2018-2028	
<p>インテグレートされた構造で望ましい特性を達成する</p>	<p>同等の酸化膜厚<0.5nm、高ブレークダウンフィールド、低リークの統合されたハイk誘電体を特定</p> <p>非常に低い接触抵抗を持つインテグレートされた接触構造を特定</p> <p>FET構造で高い正孔移動度の閉鎖バンドギャップマテリアルを実現</p> <p>FET構造で低い接触抵抗でGeの高い電子移動度を実現</p> <p>FET構造に連したグラフェンのバンドギャップの実現</p> <p>キュリー温度が400Kを超え、残留磁化が400Kを超えるマルチフェロイック</p> <p>バンドギャップと移動度が密に分布した単層CNTの合成</p> <p>電子制御の電気制御、例：モット転移、スピンダイナミクス</p> <p>ユースケース温度での低ストレスバックゲージングのための湿気及びイオン拡散バリアにより、パッケージポリマーのCTE、弾性率、電気的、熱的特性を同時に実現</p> <p>必要な電気的及び機械的特性を備えた、低い界面熱抵抗と高い熱伝導率を備えた熱界面マテリアル</p> <p>200C未満のアセンブリ、複雑のリフロー、高強度、高熱及び電気伝導率、及び高エレクトロマイグレーション耐性に対応するナノソルダ</p> <p>必要な電気的、機械的、熱的、インターフェース、及び信頼性の特性を備えたダイ接着剤として印刷できるナノインク。</p> <p>必要な電気的、機械的、熱的、インターフェース、及び信頼性の特性を備えた導体、ビアホールフィラー、はんだ、またはダイアタッチ接着剤として印刷できるナノインク</p>








難しい材料の課題 2019-2029 (2)

<p>埋め込まれた材料とそれらのインターフェースの組合特性の特性評価と制御</p>	<p>ピン止めされていないフェルミ準位と低抵抗のオーム接触を備えた高移動度遷移金属二カルコゲナイドTMD。 固定されていないフェルミ準位と低抵抗のオーム接触を備えたGeの高い電子移動度。 固定されていないフェルミ準位と低い界面抵抗を備えた高移動度ナノワイヤ。 FET構造、高移動度、誘電体界面でのピン止めされていないフェルミレベルに連したバンドギャップを持つグラフェン。 固定されていないフェルミ準位を持つ複合金属酸化物 分子/金属接触界面（すなわち、ペンタセン金）の電気的特性の特性評価。 埋め込まれたナノ接触界面（すなわち、CNT/金属）の電気的特性の特性評価。 両側に低抵抗接点を持つCNT。 Ge/III-Vチャネル材料とs_{sp}の転位密度と反位相境界生成界面の特性評価</p>
<p>必要な特性制御による確定的製造を可能にする製造可能な方法論の特定</p>	<p>ドーパントの配置と活性化、すなわち、V_{th}制御とS₂/D形成及び代替材料のための正確な位置での必要な数の確定的ドーピング。 半導体への損傷を最小限に抑えて、ドーパントを所定の位置に配置するHVM互換の方法。 必要な純度レベルを達成するための単層CNTの製造及び分離方法（バンドギャップのある純粋な半導体） 必要なオーバーレイ要件を達成できるDSAプロセス精査手法を特定します。 望ましいプロセス条件での高品質グラフェンのウェーハスケール成長（例：金属または絶縁体上の低温成長）必要なバンドギャップを実現するためのグラフェンへのエッジ制御/分子吸収の制御。 直径、キラリティー、サイト密度を制御して、事前定義された位置と方向にCNTを合成または組み立てます。 III-V：逆位相ドメインと電気的特性の相関。 カーボンナノチューブの欠陥を制御します。 グラフェンの成長と処理における欠陥を制御します。 複合金属酸化物のカチオンとアニオンの欠陥の濃度と位置を制御します。 強磁性半導体の析出を制御します。 Ge/III-Vチャネル材料とs_{sp}の転位密度と反位相境界生成界面の特性化 ドーパントの配置と活性化、すなわち、V_{th}制御とS₂/D形成及び代替材料のための正確な位置での必要な数の確定的ドーピング。</p>



難しい材料の課題 2019-2029

<p>自己組織化プロセスの制御により、目的の特性を再現可能に達成</p>	<p>生体適合性機能材料 DSA for Litho Extension: フォトマスクの構造をガイドする設計機能の変換を可能にする効率的なCADモデル。 DSA for Litho Extension: 形状、コンフォーメーション、界面粗さ、及び欠陥を制御して、自己組織化パターンング材料を希望の場所に登録します。 DSA for Litho Extension: パターンの粗さと欠陥を減らして現実的なデバイスパターンを実現します。 3D構造上でドーパントの位置をコンフォーマルに決定的に制御する自己組織化の能力を実証する。</p>
--------------------------------------	--



難しい材料の課題 2019-2029 (1)

材料と新しい研究材料の困難な課題

困難な課題 2018-2028

インテグレートされた構造で望ましい特性を達成する	同等の酸化膜厚<0.5nm、高ブレイクダウンフィールド、低リークの統合されたハイk誘電体を特定 非常に低い接触抵抗を持つインテグレートされた接触構造を特定 FET構造で高い正孔移動度の間隙バンドギャップ材料を実現 FET構造で低い接触抵抗でGeの高い電子移動度を実現 FET構造に連したグラフェンのバンドギャップの実現 キュリー温度が400Kを超え、残留磁化が400Kを超えるマルチフェロイック バンドギャップと移動度が密に分布した単層CNTの合成 電子制御の電気制御、例：モット転移、スピンドYNAMIX ユースケース温度での低ストレスパッケージングのための湿気及びイオン拡散バリアにより、パッケージポリマーのCTE、弾性率、電気的、熱的特性を同時に実現 必要な電気的及び機械的特性を備えた、低い界面熱抵抗と高い熱伝導率を備えた熱界面材料 200℃未満のアセンブリ、摩擦のリフロー、高強度、高熱及び電気伝導率、及び高エレクトロマイグレーション耐性に対応するナノソルダ 必要な電気的、機械的、熱的、インターフェース、及び信頼性の特性を備えたダイ接着剤として印刷できるナノインク。 必要な電気的、機械的、熱的、インターフェース、及び信頼性の特性を備えた導体、ビアホールフィラー、はんだ、またはダイアタッチ接着剤として印刷できるナノインク
--------------------------	---








難しい材料の課題 2019-2029 (2)

埋め込まれた材料とそれらのインターフェースの組合特性の特性評価と制御	ピン止めされていないフェルミ準位と低抵抗のオーム接触を備えた高移動度遷移金属ニカルコグナイドTMD。 固定されていないフェルミ準位と低抵抗のオーム接触を備えたGeの高い電子移動度。 固定されていないフェルミ準位と低い界面抵抗を備えた高移動度ナノワイヤ。 FET構造、高移動度、誘電体界面でのピン止めされていないフェルミレベルに連したバンドギャップを持つグラフェン。 固定されていないフェルミ準位を持つ複合金属酸化物 分子金属接触界面（すなわち、ベンタセン金）の電気的的特性の特性評価。 埋め込まれたナノ接触界面（すなわち、CNT/金属）の電気的的特性の特性評価。 両側に低抵抗接点を持つCNT。 Ge/III-Vチャネル材料とs軌の転位密度と反位相境界生成界面の特性評価
必要な特性制御による確定的製造を可能にする製造可能な方法論の特定	ドーパントの配置と活性化、すなわち、V _{th} 制御とs ₀ S/D形成及び代替材料のための正確な位置での必要な数の確定的ドーピング。 半導体への損傷を最小限に抑えて、ドーパントを所定の位置に配置するHVM交換の方法。 必要な純度レベルを達成するための単層CNTの製造及び精製方法（バンドギャップのある純粋な半導体） 必要なオーバーレイ要件を達成できるDSAプロセス簡素化手法を特定します。 望ましいプロセス条件での高品質グラフェンのウェーハスケール成長（例：金属または絶縁体上の低温成長）必要なバンドギャップを実現するためのグラフェンへのエッジ特異分子吸着の制御。 直径、キラリティー、サイト密度を制御して、事前定義された位置と方向にCNTを合成または組み立てます。 III-V：逆位相ドメインと電気的的特性の制御。 カーボンナノチューブの欠陥を制御します。 グラフェンの成長と処理における欠陥を制御します。 複合金属酸化物のカチオンとアニオンの欠陥の濃度と位置を制御します。 強磁性半導体の析出を制御します。 Ge/III-Vチャネル材料とs軌の転位密度と反位相境界生成界面の特性化 ドーパントの配置と活性化、すなわち、V _{th} 制御とs ₀ S/D形成及び代替材料のための正確な位置での必要な数の確定的ドーピング。




難しいマテリアルの課題 2029-2043 (3)

マテリアルと構造の基本的な熱力学的安定性と変動。	分子構造及び自己組織化構造における形状、構造、及び界面粗さ。 強磁性スピンや欠陥などのデバイス構造関連の特性。 ドーパントの場所とデバイスのばらつき。
モノリシックに統合された複雑な機能を可能にするマテリアルとプロセス。	CMOSプラットフォームへの統合。 柔軟な電子機器との統合。 生体適合性機能マテリアル。 生物付着の問題を回避する、堅牢で長期的な生物-生物界面。 収束マテリアルを活用することで、隣接するセクターを活用できます。



Work in Progress. Please do not distribute without permission of HIR IRC



新しい導電体とジョイントプロセスは何年も前から知られていますが、まだ大量生産には使用されていません





より薄い層の反り

反りのソリューションは既知であり、実証されていますが、生産にはインテグレートされていません

- 銅のCTEを削減（17ではなく4.5）
- 低弾性誘電体
- アンダーフィルなし
- 直接相互接続ボンディング
- すべての接合処理はユースケース温度またはその近くで行われます



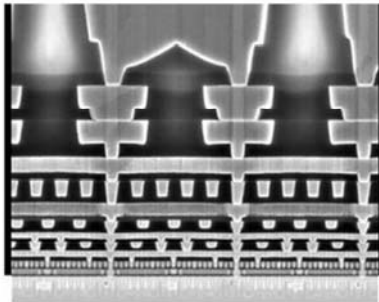
より薄い層の反り

これらのマテリアルとプロセスを組み合わせると、応力と反りの問題が解決され、パフォーマンスが向上します

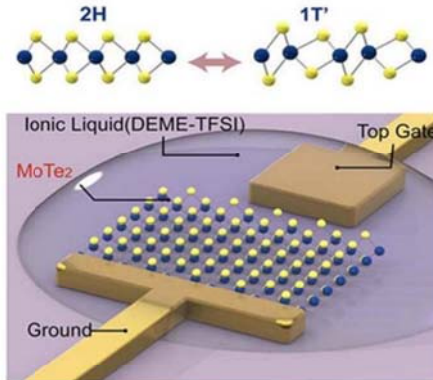




概念実証を備えた新素材の例



現在使用中のコバルトとコバルト/銅。接触抵抗が1.5倍、ライン抵抗が60%減少しました。Intel



2D MoTe_2 X の形状シフトスイッチ
Zhang, Berkeley



サーマルマネジメント

サーマルマネジメントのキーエレメント

• そもそも熱を加えないでください（デバイス設計、低周波数と高並列、サブスレッショルド動作、相互接続距離の短縮）

• 低抵抗導体

• より低い動作電圧

• Low-k誘電体

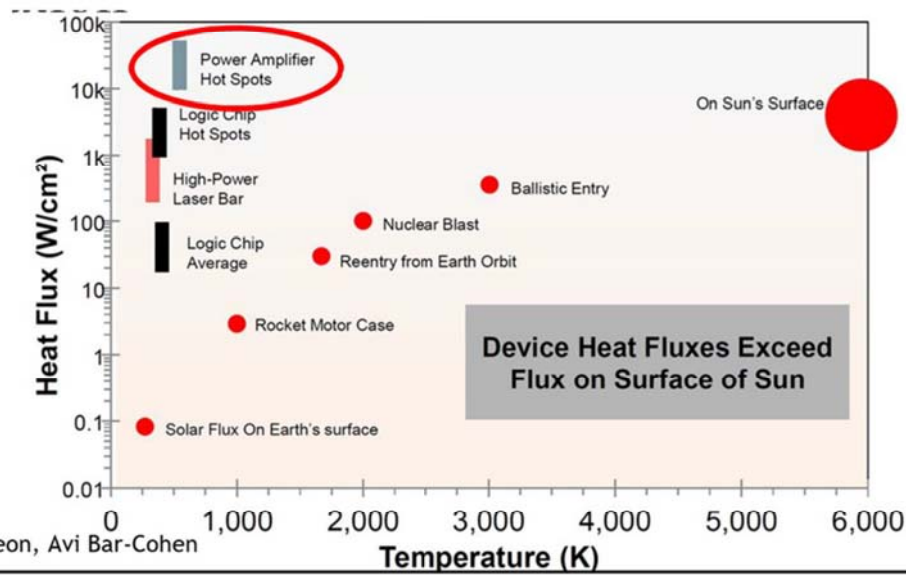
• アクティブな電圧制御

• 迅速なシャットダウンと電源投入（サブナノ秒GaN）

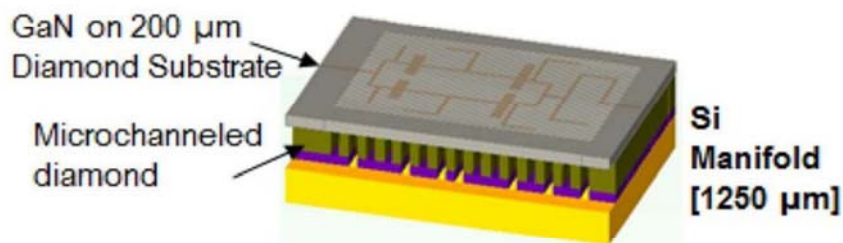
• ヒートシンクの材料と設計の改善



像力の限界に達するサーマルマネジメント



GaN増幅器に結合されたダイヤモンドマイクロチャネル



GaN-on-Diamond with diamond microchannels and wafer-bonded Si microchannel liquid manifold

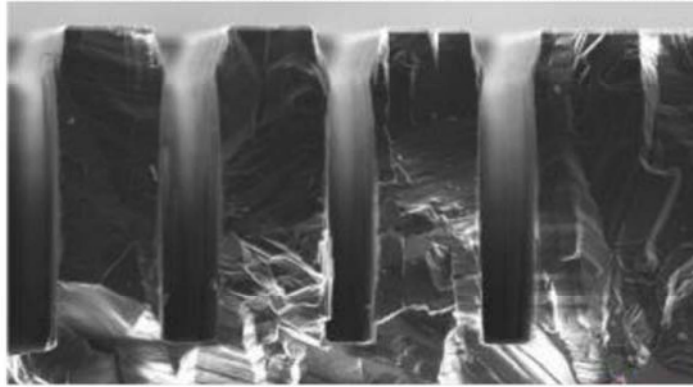
Source: Raytheon, Avi Bar-Cohen



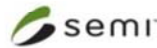
このシステムは10KW/cm²で稼働しています



Forming of High Aspect Ratio Micro-channels in Diamond



Source: Raytheon, Avi Bar-Cohen



次の四半世紀のための材料の要件の例

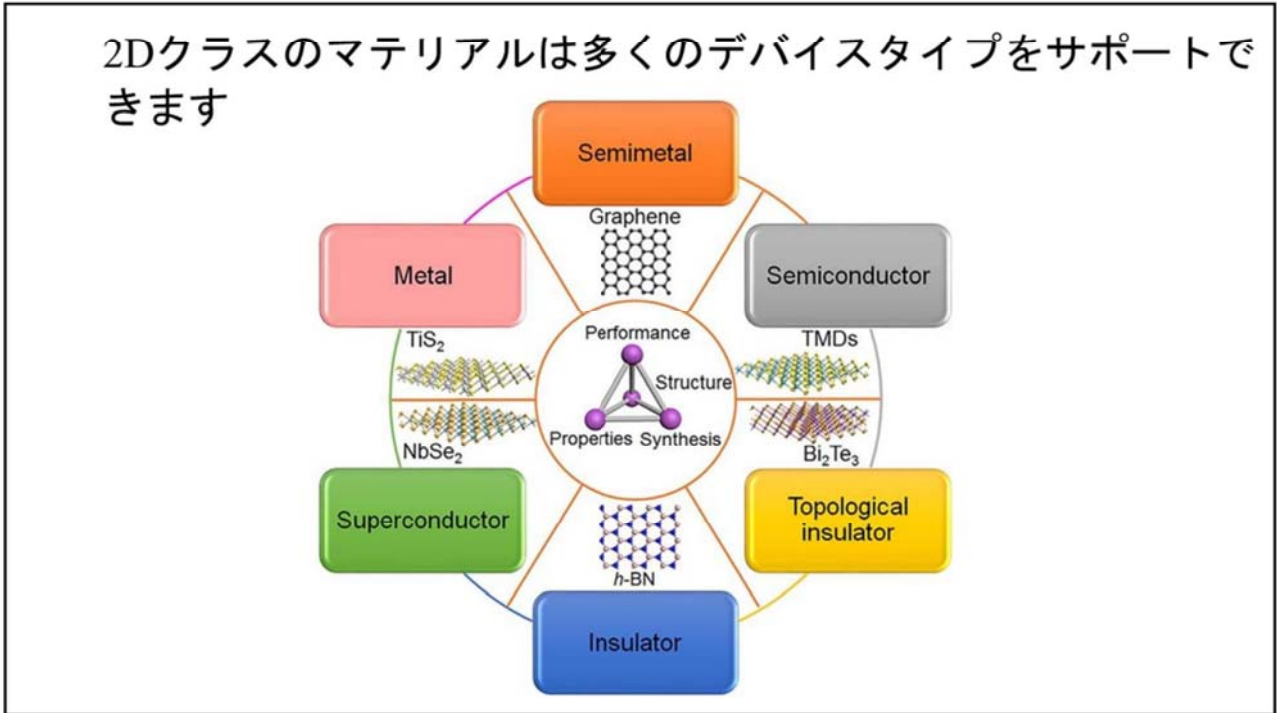


CMOSスイッチを置き換えるための新しい材料

- 2D材料：おそらく他の原子で作られたCNTおよびグラフェン類似物
- 相互接続およびデバイススイッチ構造用のナノワイヤ
- 原子レベルの機械的スイッチに使用できる導体
- 全光ロジックをサポートする光スイッチ材料
- 「脳」エネルギーレベルスイッチ用の生体材料
- 複雑な相互接続システムでの自己組織化のための生体材料
- まだ想像できないこと

**25年の期間には、材料の開発以上のものが含まれます。
量産をサポートするために、機器、プロセス、サプライチェーンを整備する必要があります。**





Nano-Infused Ceramic Self-Report For Self-reporting Structural Sensors (Composite Materials)

Ceramic
Graphene
Ceramic

HIR
HETEROGENEOUS INTEGRATION ROADMAP

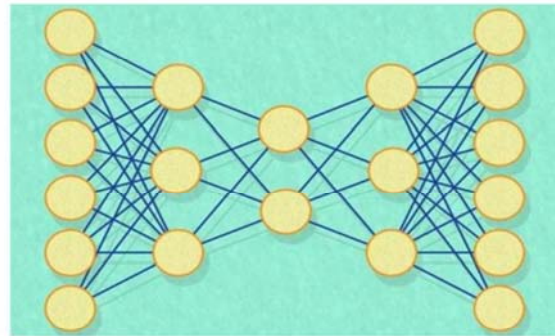
IEEE
IEEE Photonics Society
semi
IEEE ELECTRONICS PACKAGING SOCIETY
ASME
ELECTRON DEVICES SOCIETY

人工知能は新しいマテリアルを設計するかもしれない



MITシステムは、元のレシピを生成するための自然なメカニズムを提供する統計的方法を使用します。これは、実際のレシピとよく一致する既知のマテリアルの代替レシピを提案します。

AIとビッグデータは、アプリケーション固有のマテリアルの設計を学ぶことができます



機械学習システムは、オートエンコーダを使用してマテリアルの「レシピ」を分析します。トレーニングが成功すると、システムはデータの特性を取得します。
Image: Chelsea Turner/MIT



サマリー



- マテリアルのサブチャプタは、困難な課題と潜在的なソリューションを特定し、選択した例の表で量産の見込み日を特定します。
- 新たな研究マテリアルのサブチャプタは、難しい課題を特定し、可能な場合は、選択した例の潜在的なソリューションを特定します。大量生産の日付の予測はありません。

私たちの目的は、競争前のコラボレーションを刺激することにより、進歩のペースを加速することです。

