

# ショットキーバリアダイオードの基礎

## 1章 ショットキーバリアダイオードの基礎(半導体の基礎)

**TOSHIBA**

# 1. 導体・半導体・絶縁体

物質は電気の流れやすさから3つに分類されます。

- 導体 物質は電気を良く通す (電気伝導率の良い・電気抵抗率の低い)
- 半導体 導体と絶縁体の中間となる性質
- 絶縁体 電気を通しにくい (電気抵抗率の大きい)

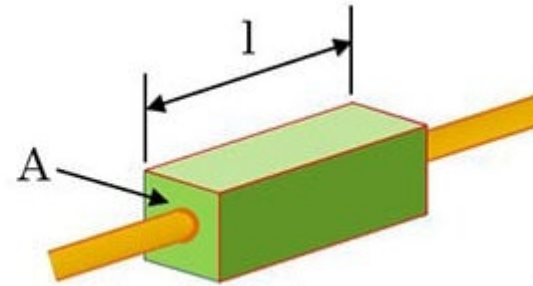
電気の通しやすさを抵抗率で表すと、導体が $10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 、絶縁体が $10^8 \sim 10^{18} \Omega\text{cm}$ であるのに対し、半導体は $10^{-4} \sim 10^8 \Omega\text{cm}$ あたりの範囲に分布しています。



# 1. 導体・半導体・絶縁体

電気抵抗 ( R ) は電子の流れにくさを表します。そのため物質の長さ ( l ) が長くなるほど大きく ( 長さに比例 ) なり、断面積 ( A ) が大きくなるほど小さく ( 断面積に反比例 ) になります。また、それぞれの物質は固有の抵抗率 ( ρ ) を持ちます。これを式で表すと以下になります。抵抗率は最外殻電子のエネルギー準位 ( バンド ) や結晶の状態などにより決まります。

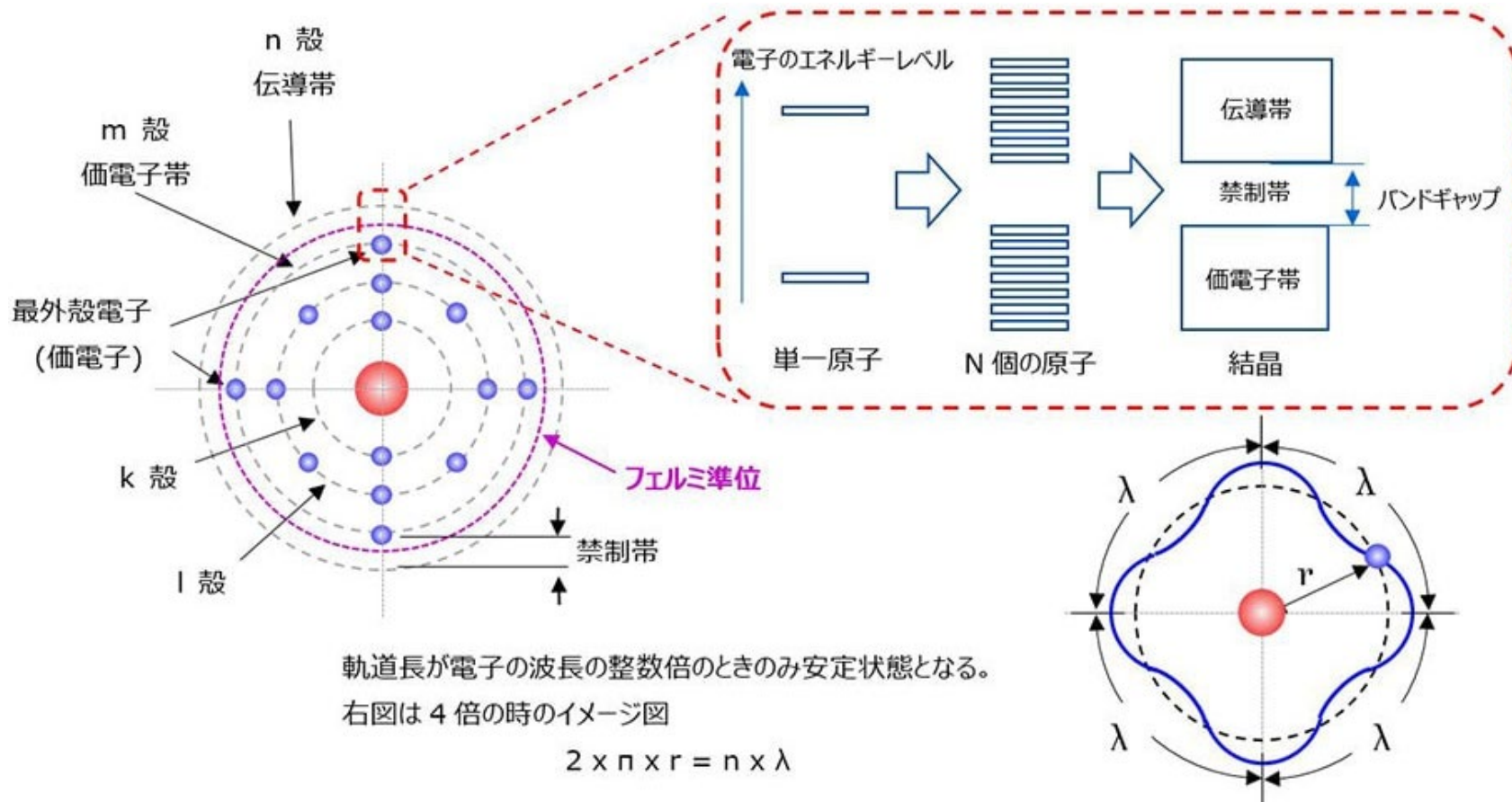
$$R = \rho \times \frac{l}{A}$$



# 1.1. エネルギーバンド図

物質に電気が流れる場合、物質内に存在する自由電子が関与します。これら自由電子は原子が持つ電子ですが、原子との結束が緩く自由に動き回れる電子です。

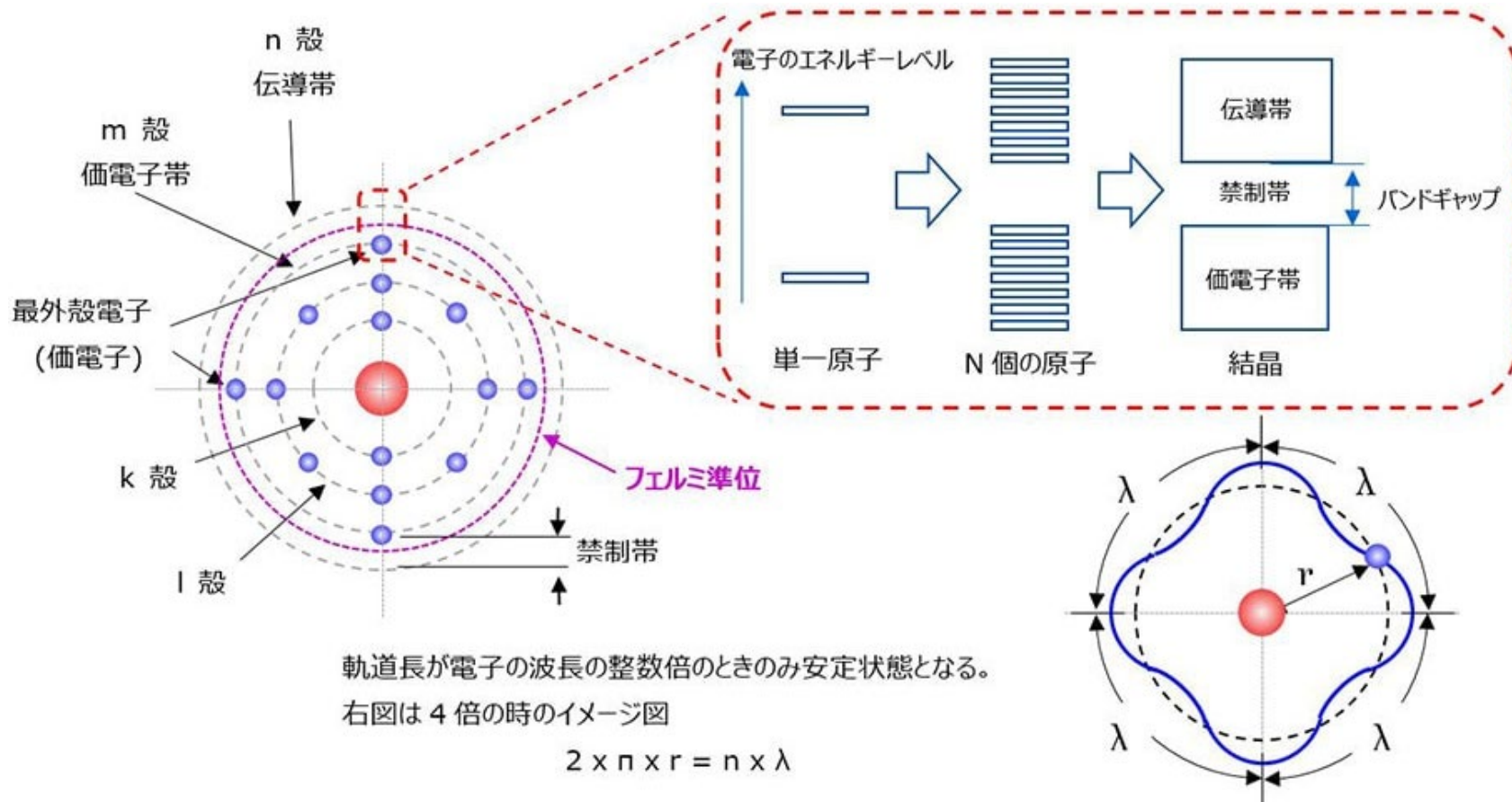
古典的な物理学に陽子と中性子による原子核の周りを複数の軌道を持った電子がまわっているボーアモデルがあります。物質ごとに固有の電子を持ち、これら電子は原子核に近い軌道から埋まっていきます。例えばシリコン (Si) の場合、14個の電子を持ちます。半導体であるSiのモデルを図に示します。



# 1.1. エネルギーバンド図

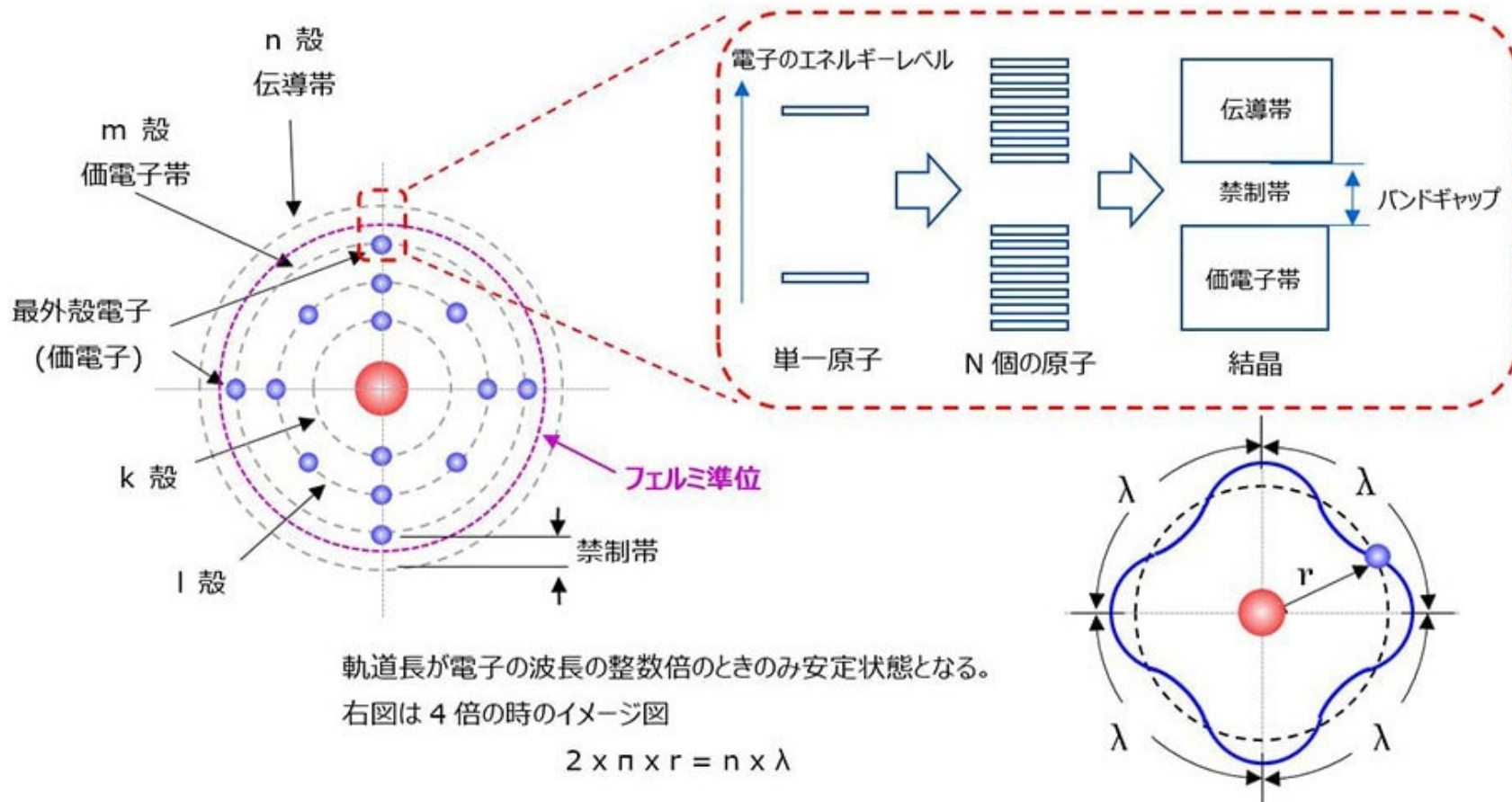
電子は波の性質を持っているため、波長の整数倍の軌道長を持つ軌道半径でしか安定しません。このためボーアモデルで示すような離散した軌道を持ちます。

単一原子の場合、この軌道は非常に狭いエネルギー幅です。しかし、電子は同一の軌道を持つことができないとされています（パウリの排他律）。このため、単一原子⇒分子⇒結晶 と複数の原子が近接した構造を持つようになると、帯のようなエネルギー状態となります。



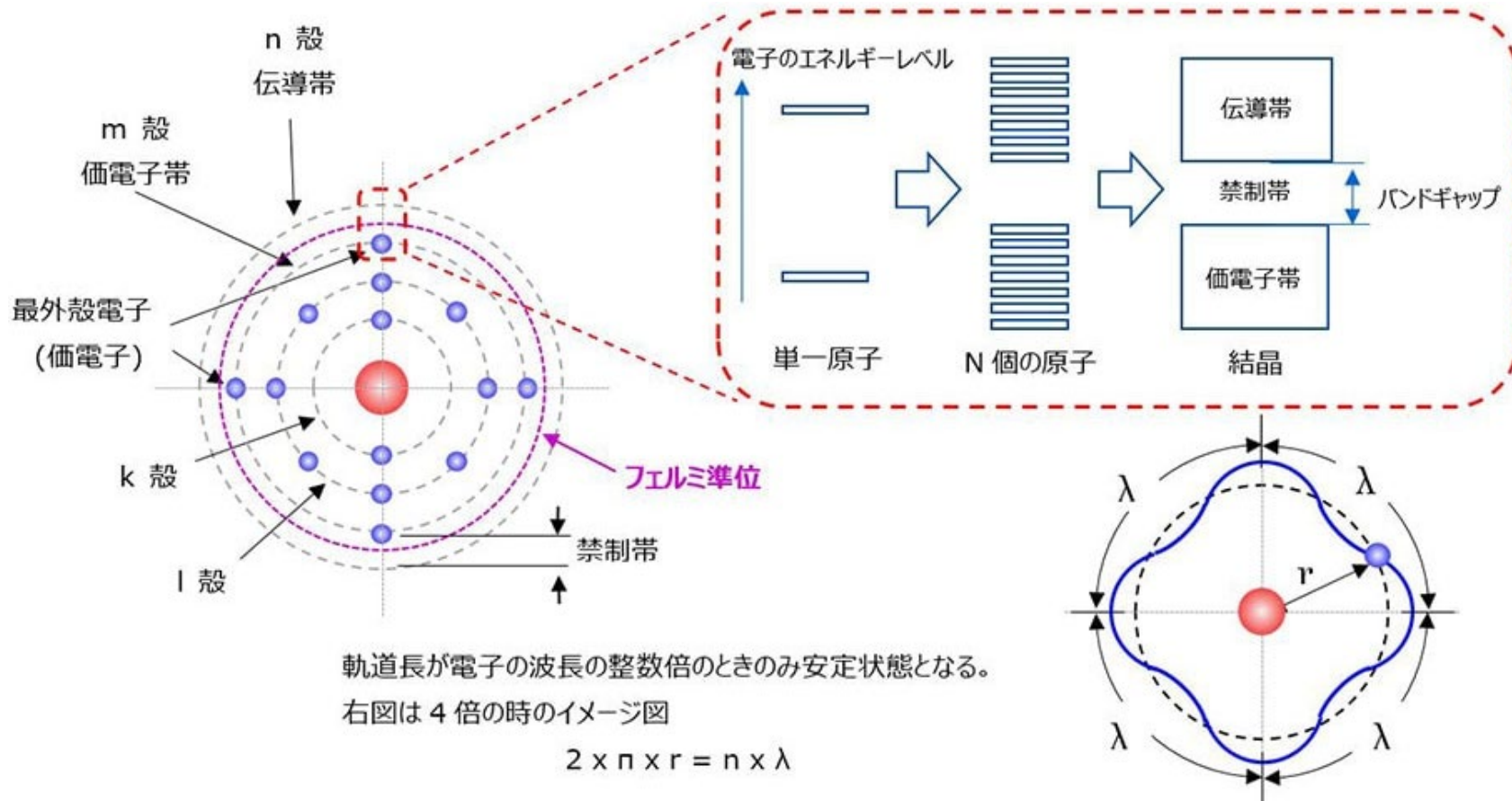
# 1.1. エネルギーバンド図

電子は原子核に近い軌道ほど原子核と強い結束力を持っています。最も弱い結束力を持つ最外殻の電子を価電子、この最外殻軌道を価電子帯、その外側の軌道を伝導帯と呼びます。また、電子は波の性質があり価電子帯と伝導帯の間には禁制帯と呼ばれる電子が安定して存在できない帯があります。



# 1.1. エネルギーバンド図

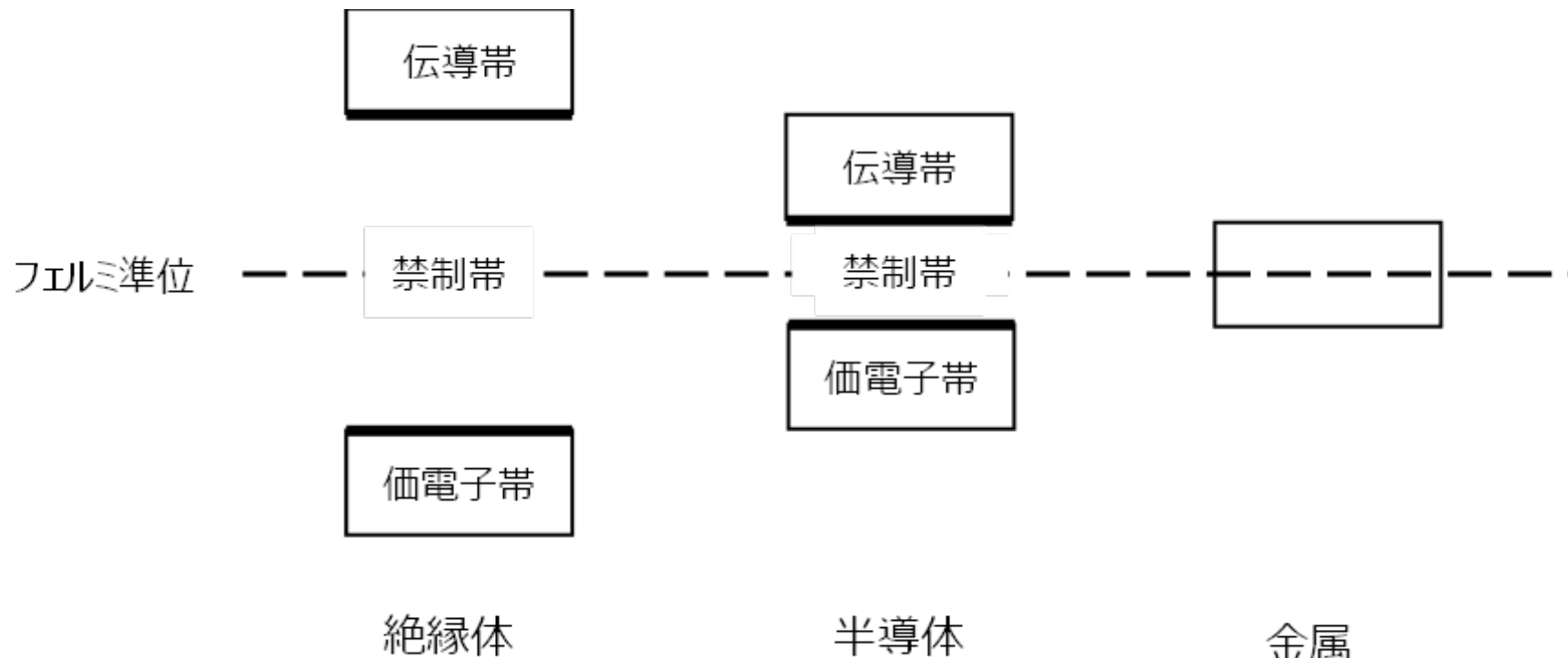
電子は価電子帯にある時は原子核からの拘束を受け自由に動くことはできません。電子が自由に動くためには、外部から電子が熱や光などのエネルギーを得て価電子帯から少なくとも伝導帯に移る必要があります。（例えば m殻 ⇒ n殻）このとき必要な最小のエネルギーがバンドギャップとなります。



## 1.1. エネルギーバンド図

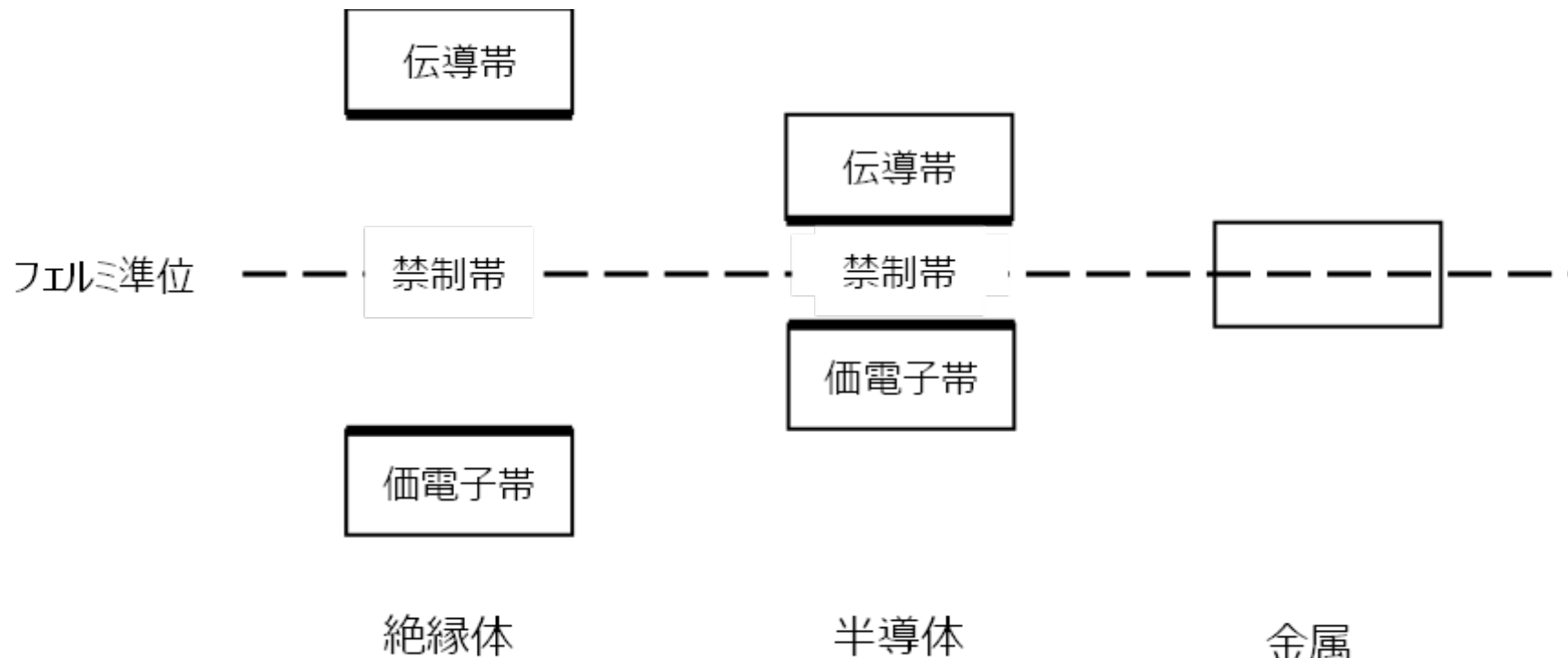
絶縁体・半導体・金属のエネルギーバンド図は以下ようになります。

絶縁体・半導体は電子が充填している最外殻軌道が価電子帯、電子の存在しない軌道を伝導帯と呼んでいます。ただし金属の場合、最外殻の電子軌道である伝導帯は、電子が全ての軌道を充填していません。このように、空軌道も存在することから電子は自由電子として動くことができます。



## 1.1. エネルギーバンド図

価電子帯と伝導帯の間は禁制帯と呼ばれます。この区間は電子が安定して存在できません。また、このエネルギー幅をバンドギャップと呼びます。絶縁体に比較して半導体は禁制帯が狭く（バンドギャップが低く）なっています。絶縁体と半導体の場合、伝導帯と価電子帯の間にフェルミ準位（フェルミレベル）があります。金属の場合、伝導に寄与する電子のエネルギー準位が存在するバンドの中にフェルミ準位があります。フェルミ準位は電子が軌道を占有する確率が1/2になるエネルギーレベルと定義されますが、実際には絶縁体・半導体では禁制帯にあり電子は存在しません。

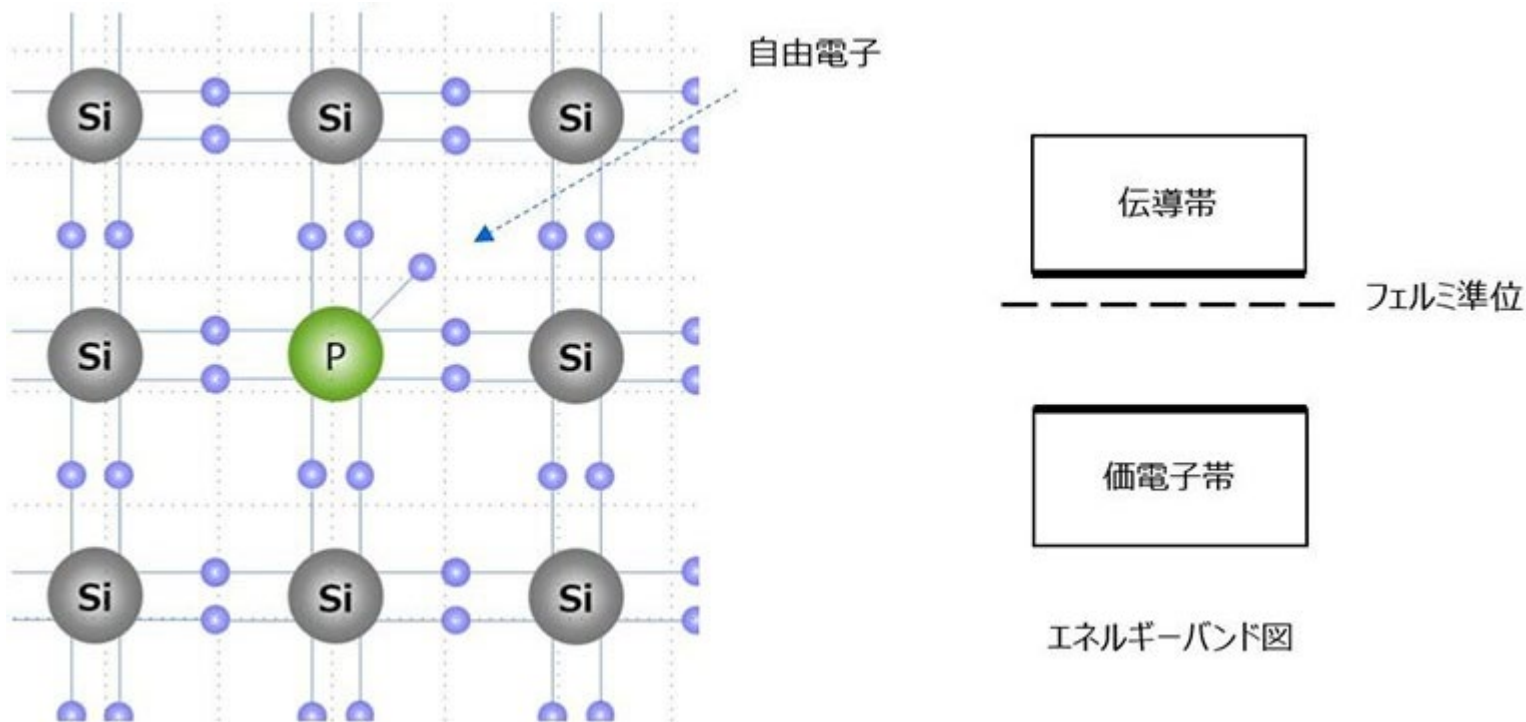


## 1.1. エネルギーバンド図

不純物を含まない真性半導体にリン P やホウ素 B などの不純物を添加したn型半導体・p型半導体の場合を説明します。

n型半導体：

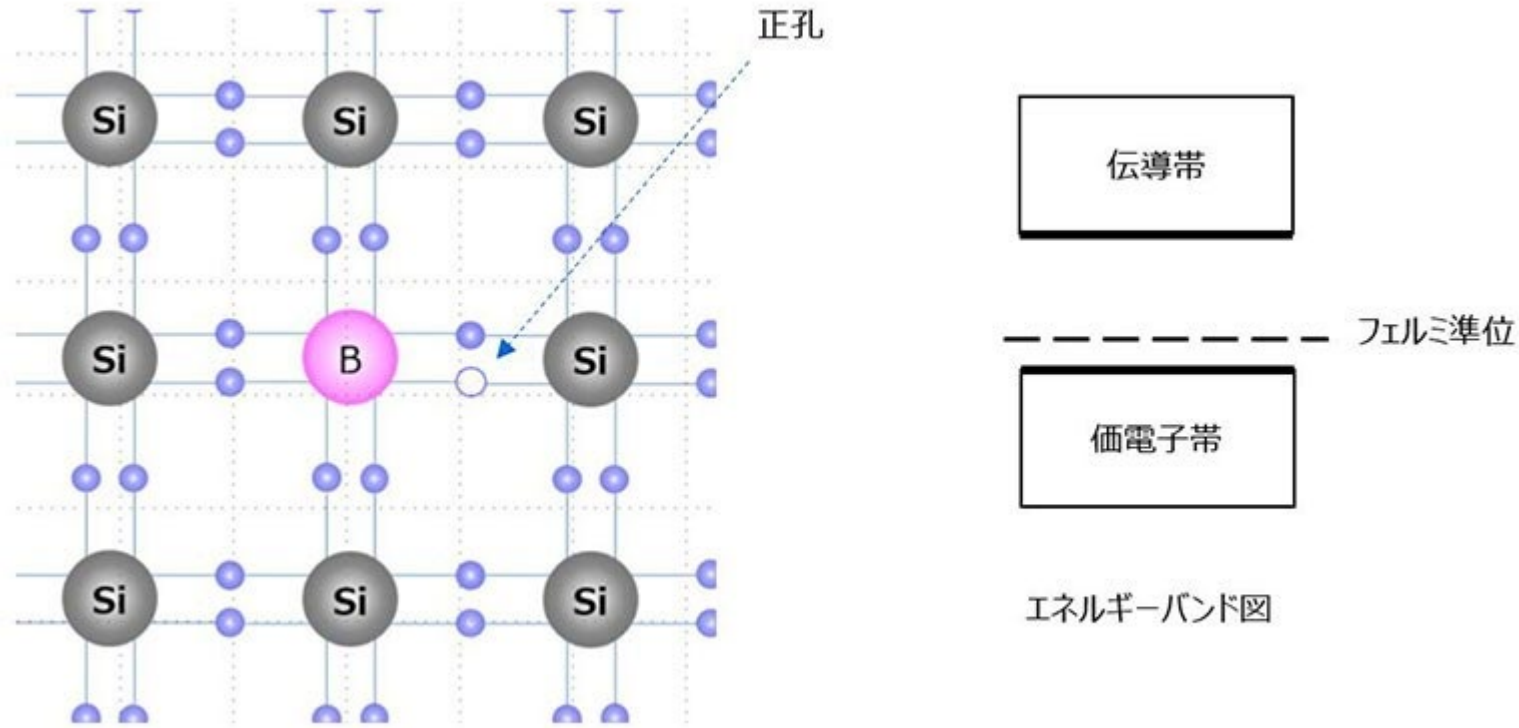
Siは結合の手が4本ある4価の物質です。不純物の無い真性半導体のSi結晶に5価の物質（リン P、ヒ素 As、アンチモン Sbなど）を不純物として添加します。結合に不要な価電子1個はわずかなエネルギーで原子から放出され自由電子として振舞います。電子が過剰になるので、常温ではフェルミ準位は伝導帯に近づきます。



# 1.1. エネルギーバンド図

P型半導体：

Siに3価の物質（ホウ素 B、インジウム In、ガリウム Gaなど）を不純物として添加します。Siとの結合に不足している電子が1個は、他のSi原子から電子を奪い取ります。この不足した結合は正孔（ホール）と呼ばれ自由電子と同じように結晶内を動き回ります。正孔が過剰になるので、常温ではフェルミ準位は価電子帯に近づきます。

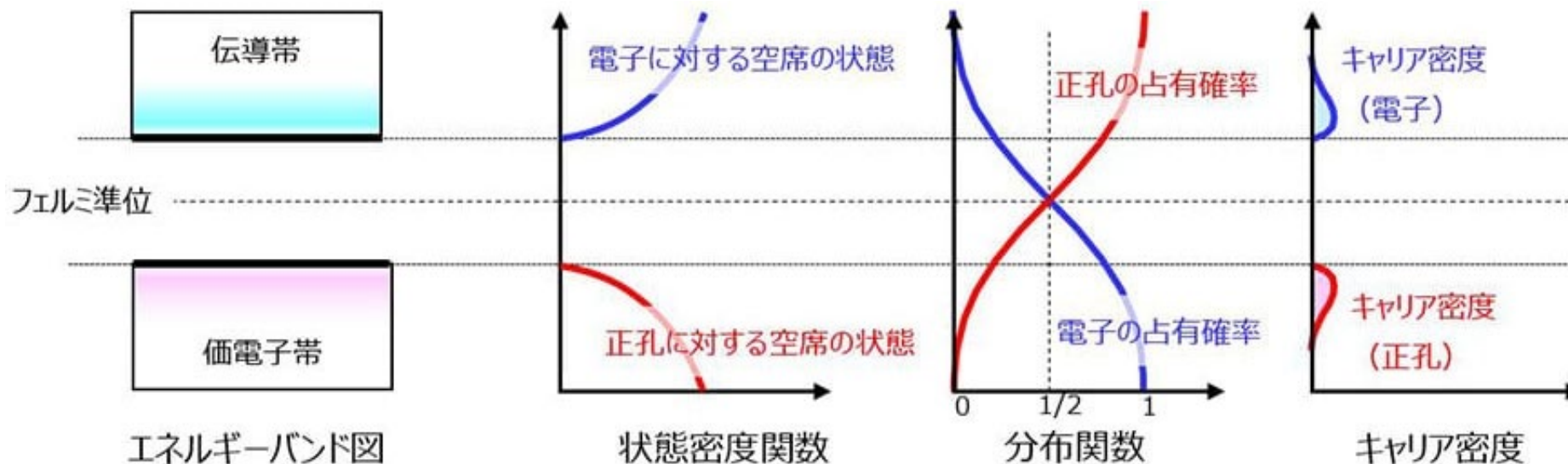


## 1.2. 真性半導体 Siの特性

伝導帯にある自由に動き回れる電子、価電子帯にある自由に動き回れる正孔は電荷を運ぶ担い手なのでキャリアと呼ばれます。このキャリアの数によって電流の大きさが決まります。詳細な式は省きますがキャリア密度は以下の式で求められます。

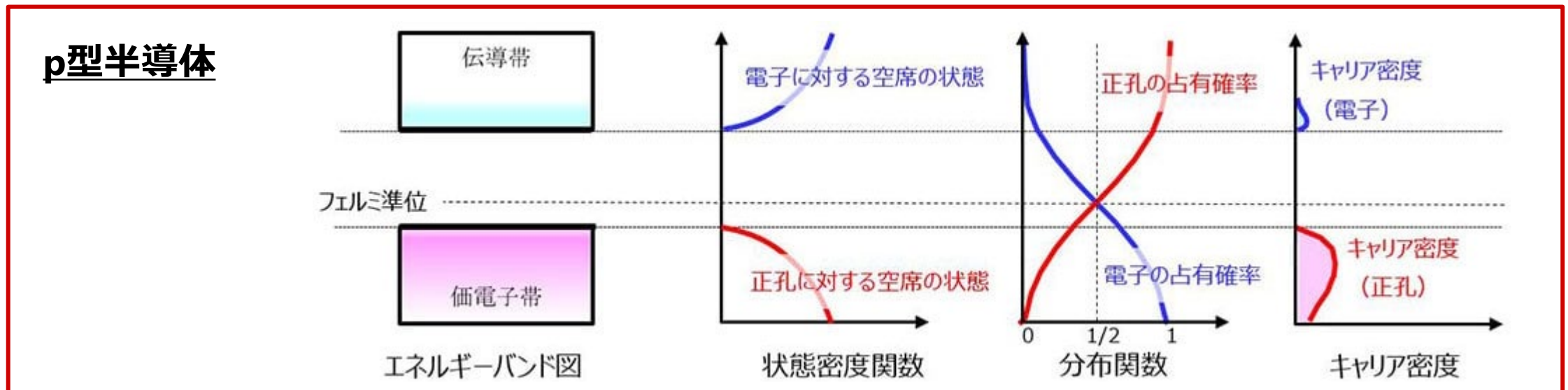
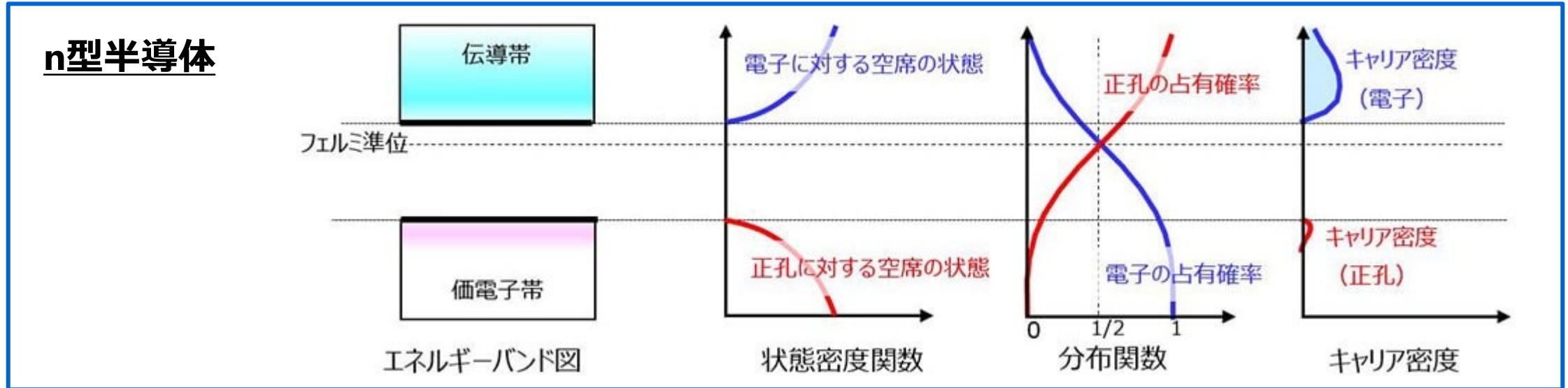
$$\begin{array}{l} \text{状態密度関数} \\ \text{(電子が占有できるエネルギー状態数の密度)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{分布関数} \\ \text{(フェルミディラック分布)} \end{array} = \text{キャリア密度}$$

不純物の無いSiの各状態を図に示します。非常にわずかな量ですが、伝導帯に電子・価電子帯に正孔が存在します。これらは同一なエネルギーで均一な密度になるように自由に動きます。



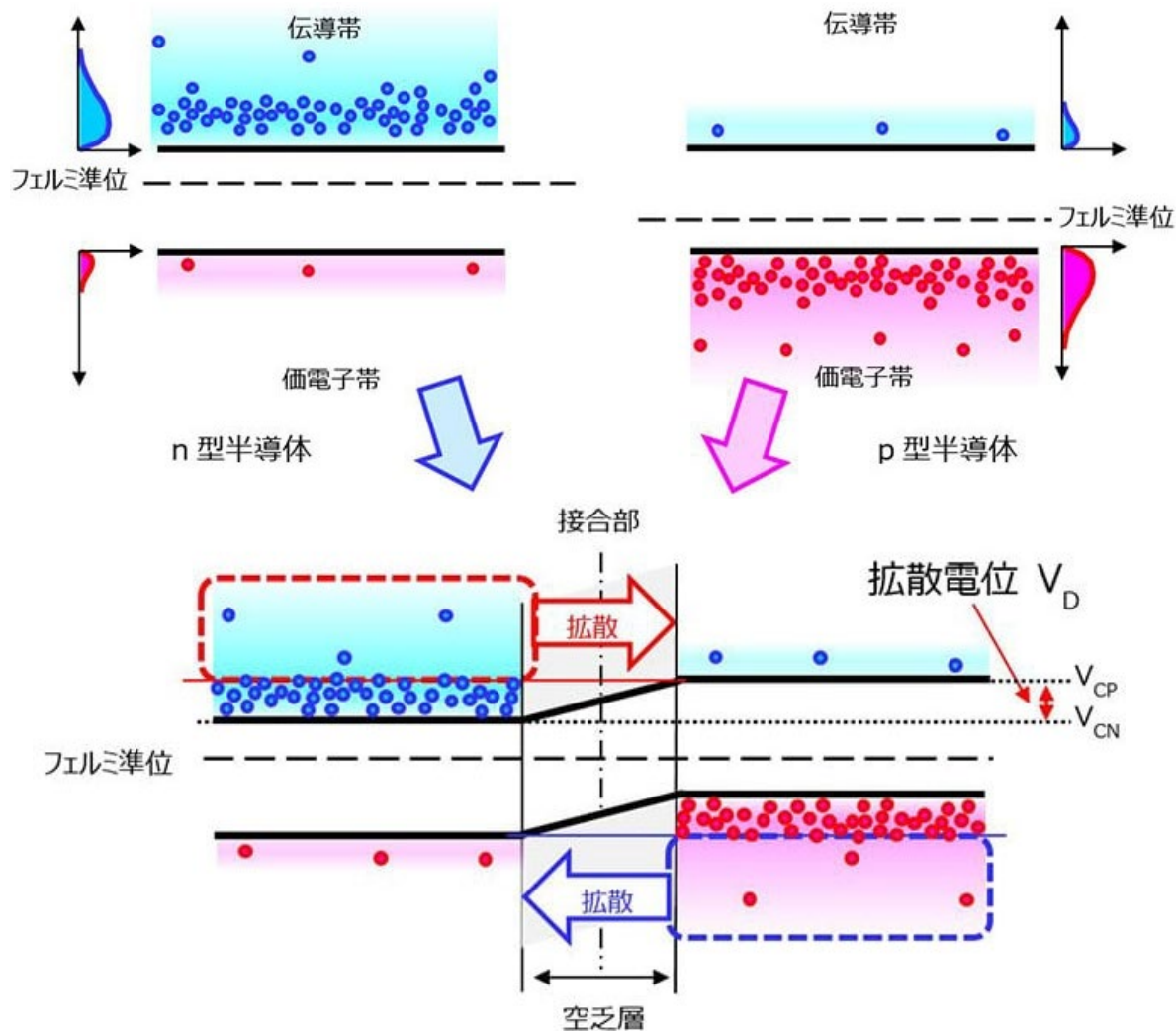
## 1.2. 真性半導体 Siの特性

n型半導体、p型半導体のキャリア密度は以下ようになります。



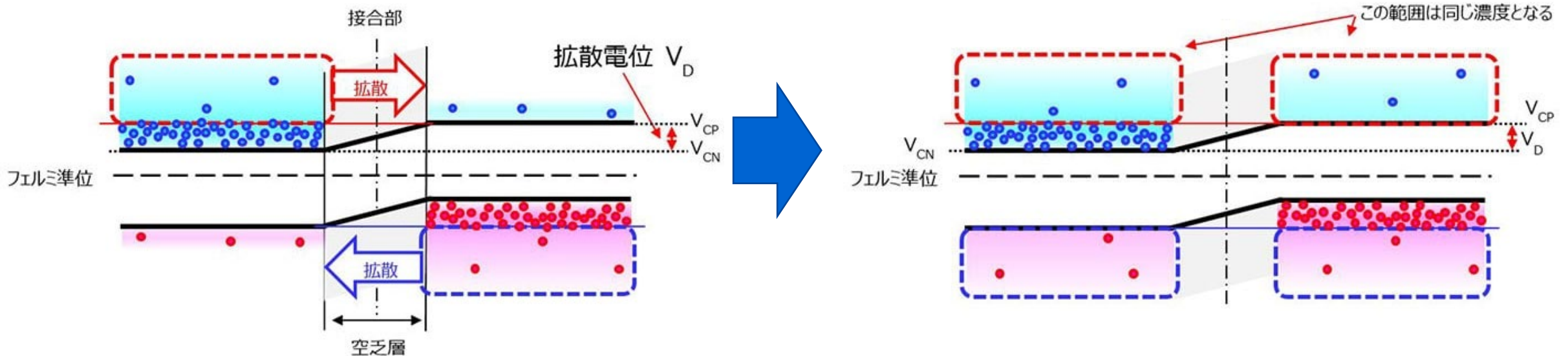
# 1.3. pn接合

SBDダイオードの説明の前に最も基本的なダイオードの接合であるpn接合について簡単に説明します。  
p型半導体とn型半導体を接合させると、フェルミ準位が一致します。このときn型半導体の伝導帯最下部電圧  $V_{CN}$  とp型半導体の最下部電圧  $V_{CP}$  の間に電位差が生じます。この電圧を拡散電圧  $V_D$  と呼びます。



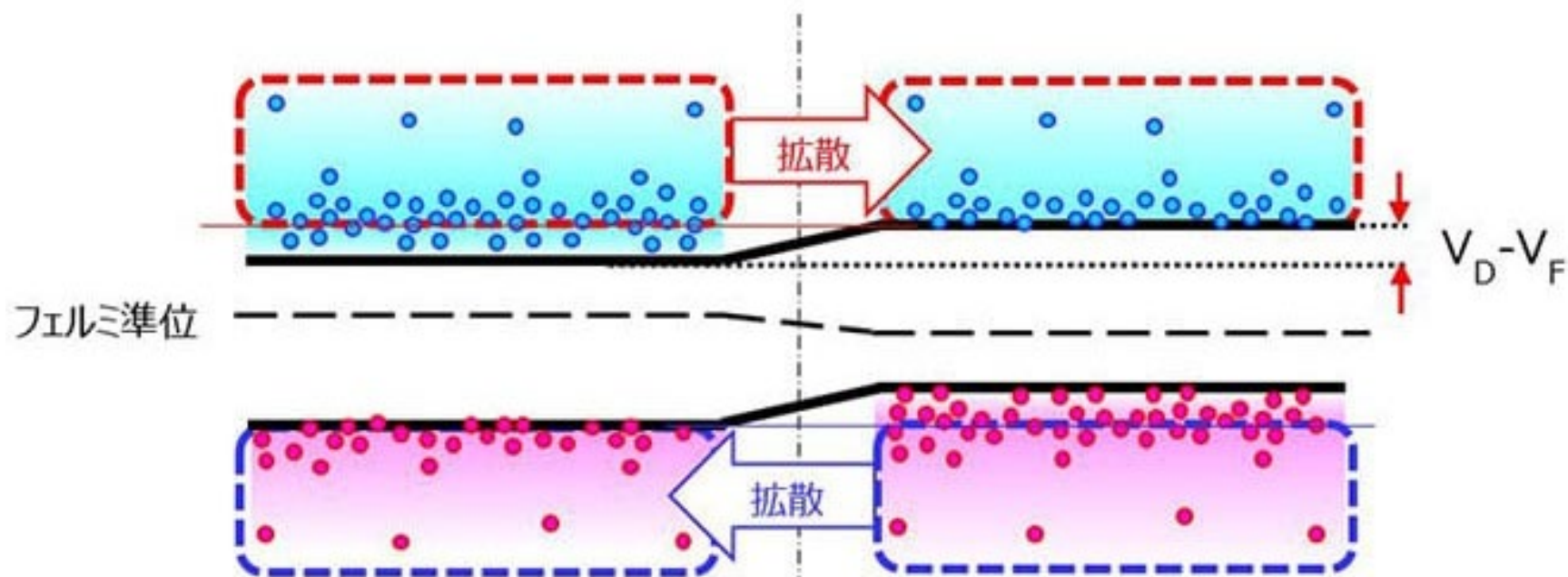
### 1.3. pn接合

接合部付近ではn型半導体のキャリアである電子とp型半導体のキャリアである正孔が打ち消しあい消滅し、キャリアの存在しない空乏層と言われる区間が発生します。この状態になると、n型半導体の多数キャリアである電子の一部はp型半導体に拡散します。拡散する電子は拡散電位を超えるエネルギーを持つ電子です。このことにより拡散電位を超える範囲ではn型半導体とp型半導体の電子の濃度は均一になります。同様にp型半導体の多数キャリアである正孔の一部はn型半導体に移動します。このキャリア（電子や正孔）の移動による電流を拡散電流と呼びます。これ以外に、電圧（電界）印加時に発生するドリフト電流があります。空乏層内部を除き、拡散電流が主な電流になります。図の状態ではバイアスは印加されていないので、平衡状態になると電流はとまります。



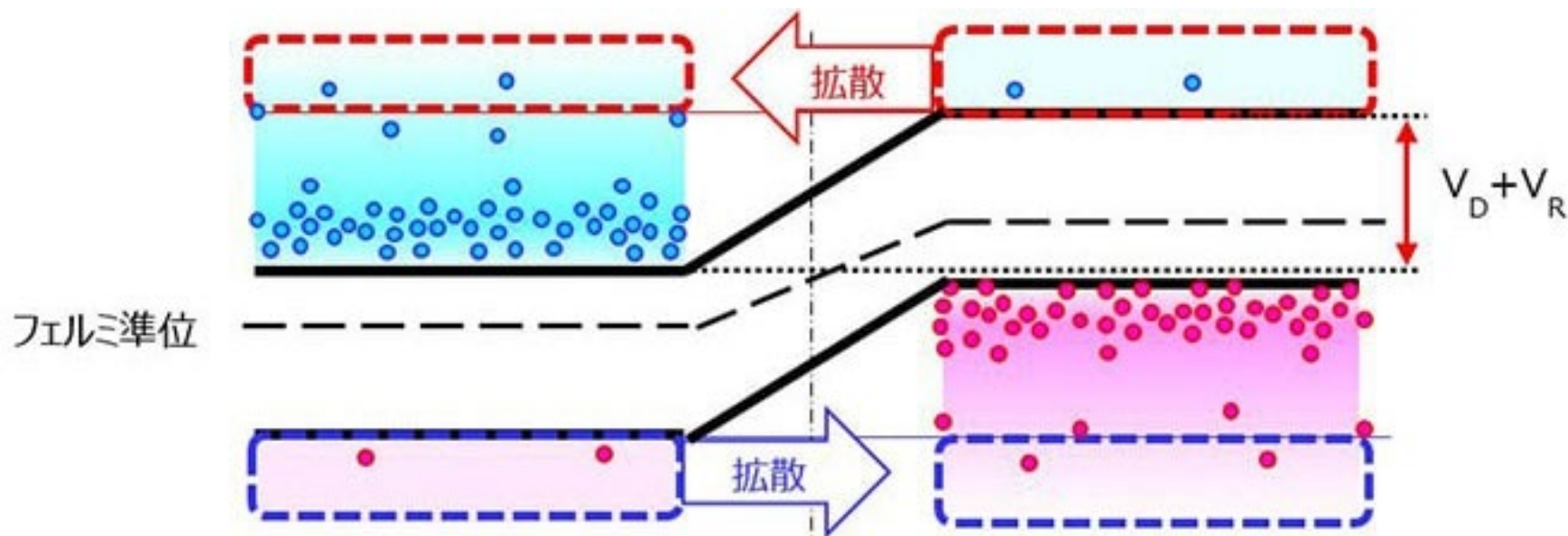
## 1.3.1. 順バイアス

p型半導体側にプラス電圧、n型半導体側にマイナス電圧を印加することを順バイアスと言います。順バイアス $V_F$ が印加されると、印加された電圧のほとんどはジャンクション面にかかり、拡散電圧を $V_F$ だけ押し下げます。この結果、n型半導体では多数キャリアである電子のより濃度の濃い部分までが拡散されることになります。（p型半導体でも多数キャリアの正孔がより濃度の濃い部分までが拡散されます）。n型半導体では電子が拡散により減少した分はバイアスから注入され電子濃度が保たれます。同様にp型半導体では正孔が注入され（電子が引き抜かれ）電流が流れ続けます。



## 1.3.2. 逆バイアス

逆バイアス $V_R$ を印加した場合、拡散電圧は $V_R$ だけ高くなり、拡散障壁 ( $V_D+V_R$ ) を超える部分では、無バイアス・順バイアスの時とは逆にn型半導体の多数キャリアである電子の濃度よりもp型半導体の少数キャリアである電子の濃度の方が高くなります。これによってp型半導体の少数キャリアである電子がn型半導体に拡散されます。拡散される少数キャリアは順方向バイアスの時に比べ非常に少ないですが、p型半導体では拡散により減少した少数キャリアである電子が、n型半導体では正孔がバイアスから注入され電流が流れます。このため順方向バイアスの時とは逆方向の電流（逆電流）が流れます。この電流は少数キャリア濃度により制限されるので、非常に小さくなります。



# 製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。  
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社Webサイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品のRoHS適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制するRoHS指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

**TOSHIBA**