

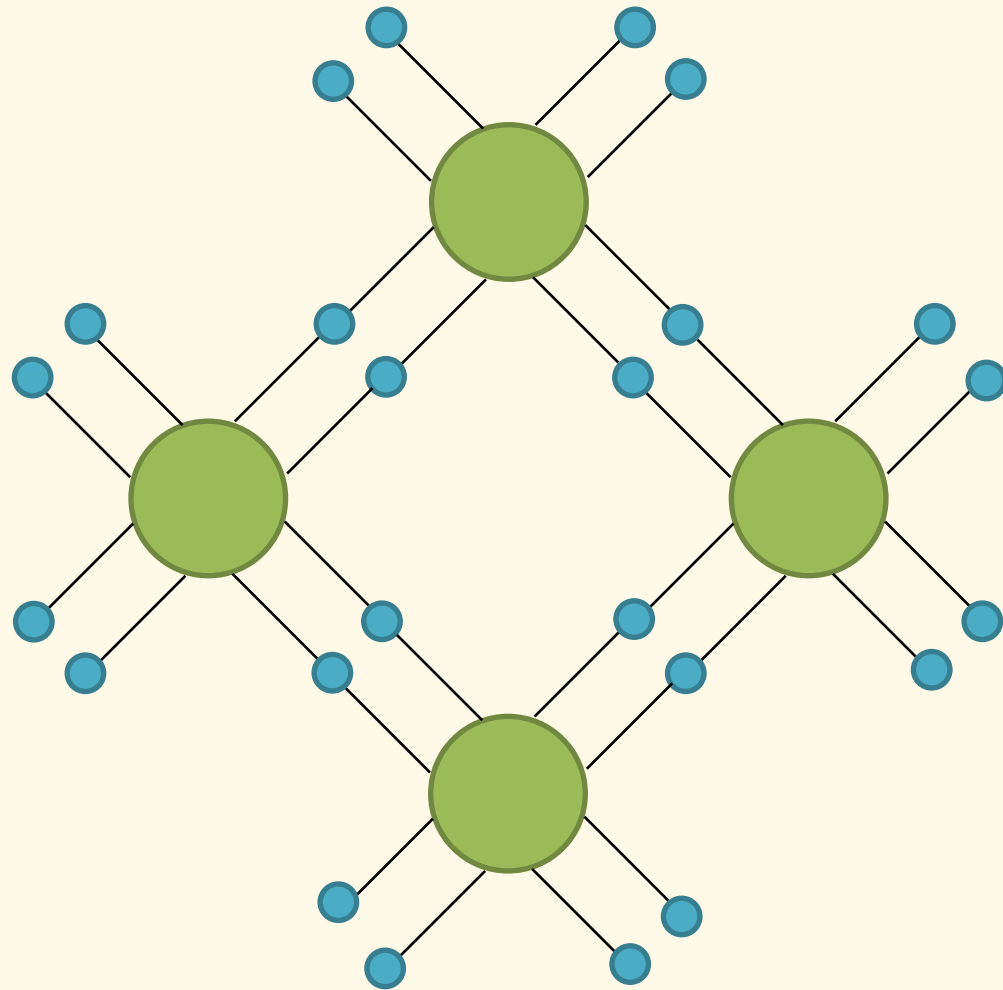
電子工学08

津山工業高等専門学校 情報工学科 講師
電気通信大学 先進理工学科 協力研究員
藤田一寿

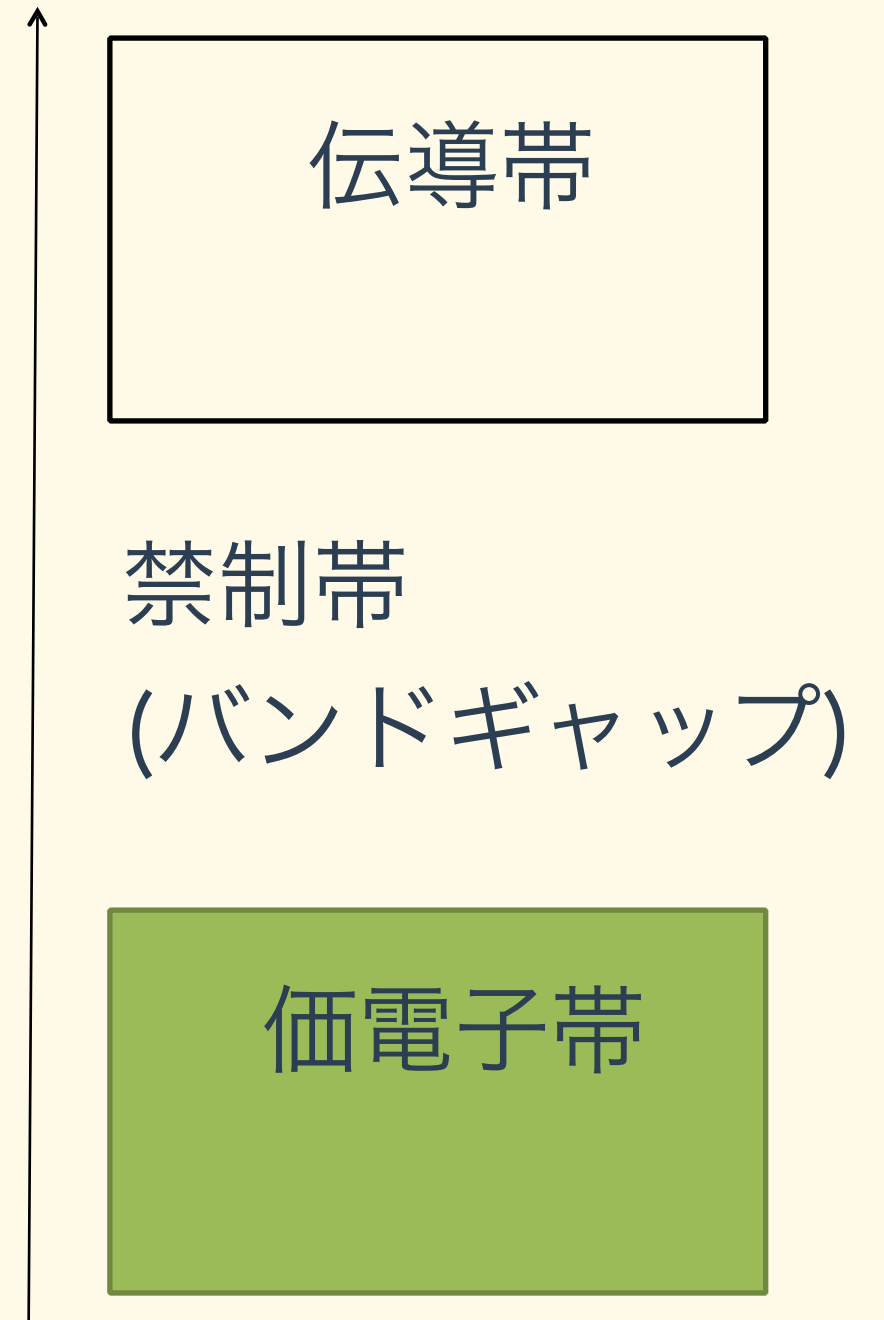
真性半導体

- ▶ 不純物や結晶格子の欠陥が全くない単結晶半導体
- ▶ Siの場合半導体用途で11N(純度99.9999999999%イレブンナイン)で製造される。

絶対零度するとき

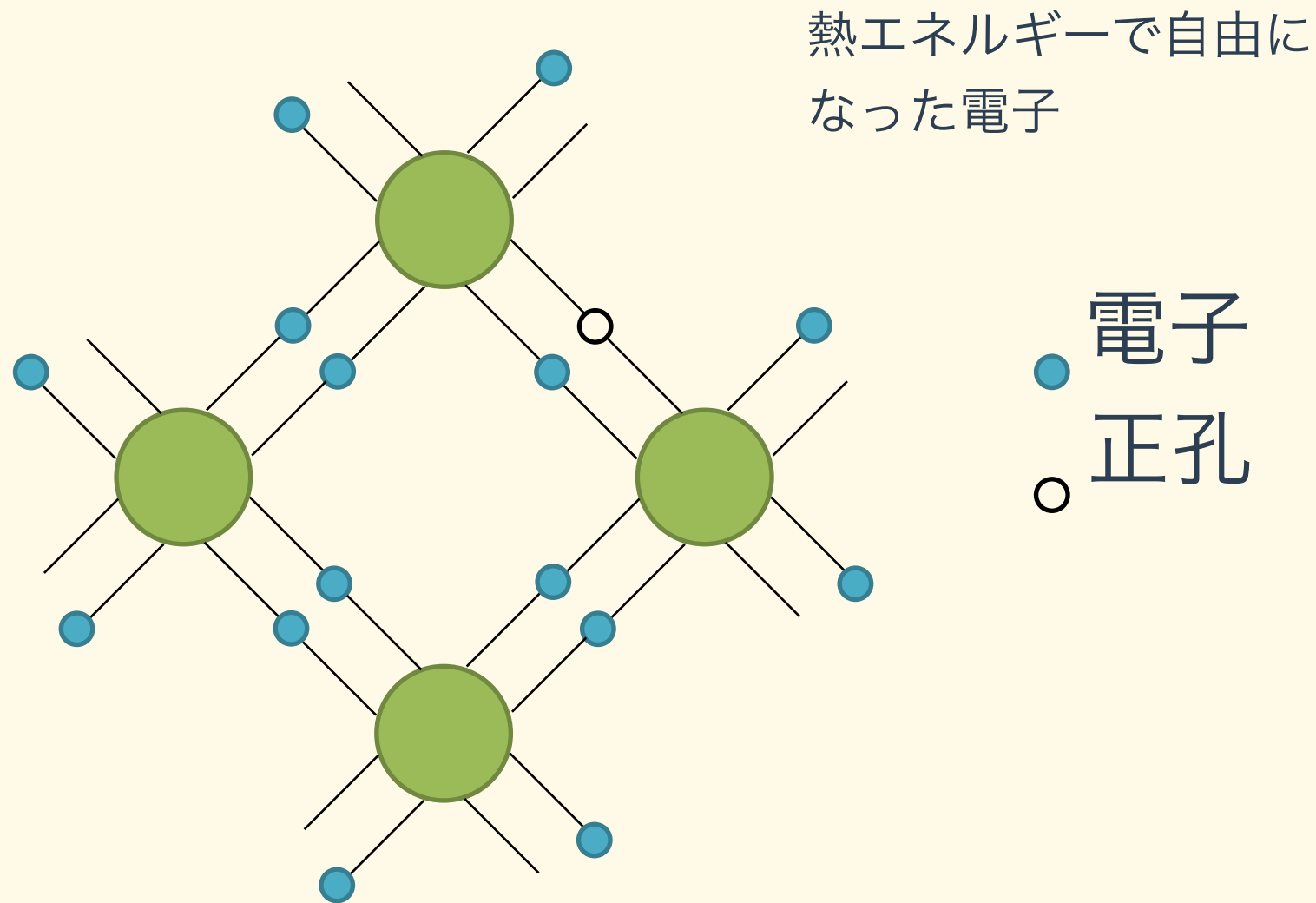


電子はすべて結合に寄与する

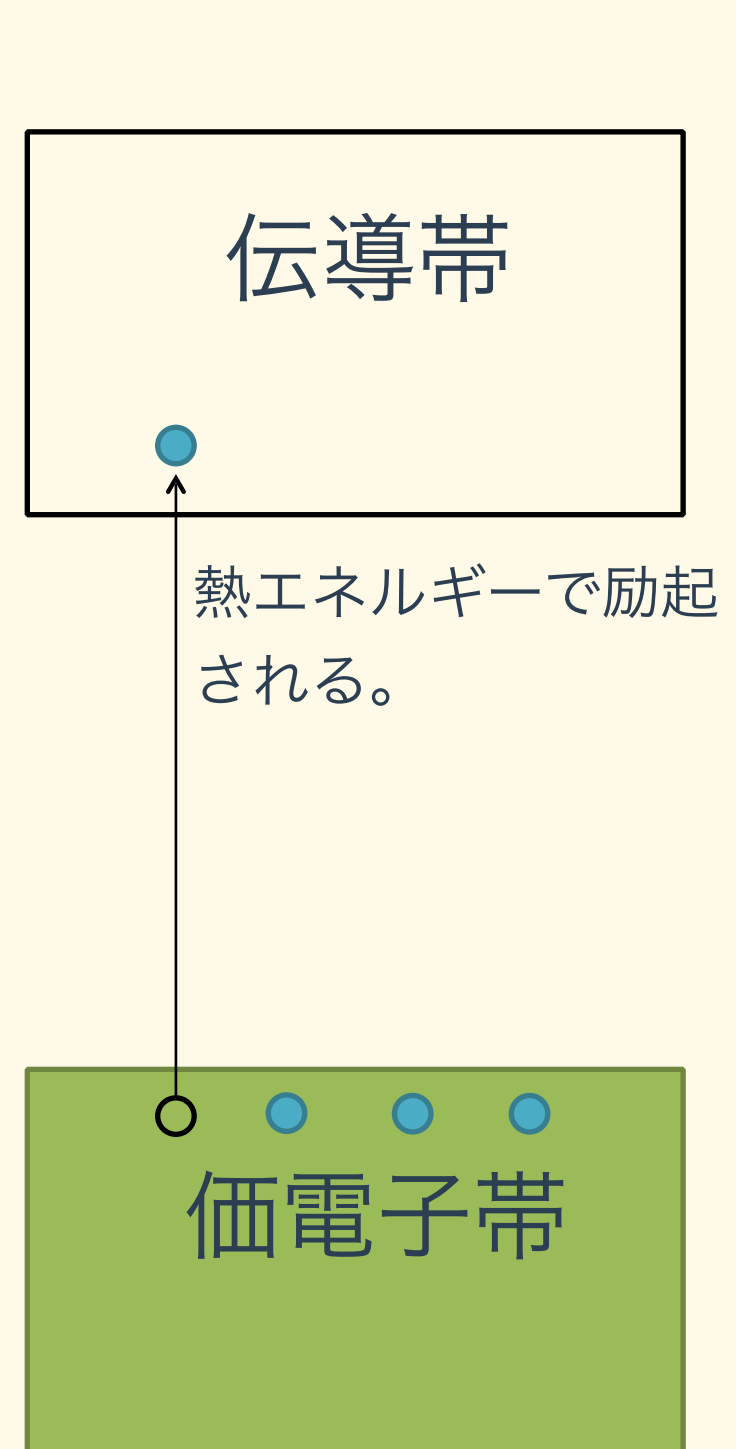


伝導帯に電子はなく
電気は流れにくい

$T > 0$ の場合



熱エネルギーで一部の電子が自由になる。電子がもともと板場所には+の電気的性質を持ったあな（孔）があく。これを正孔と呼ぶ。

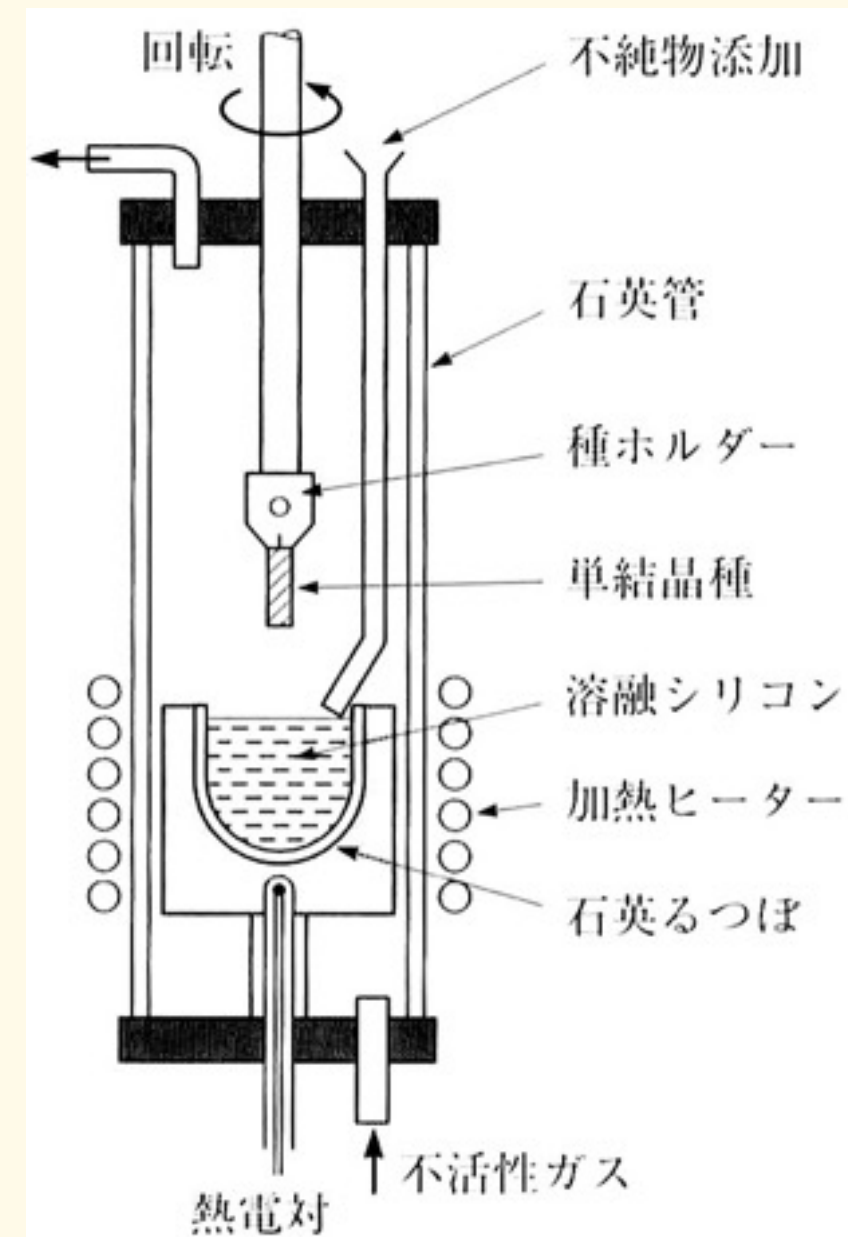


真性半導体

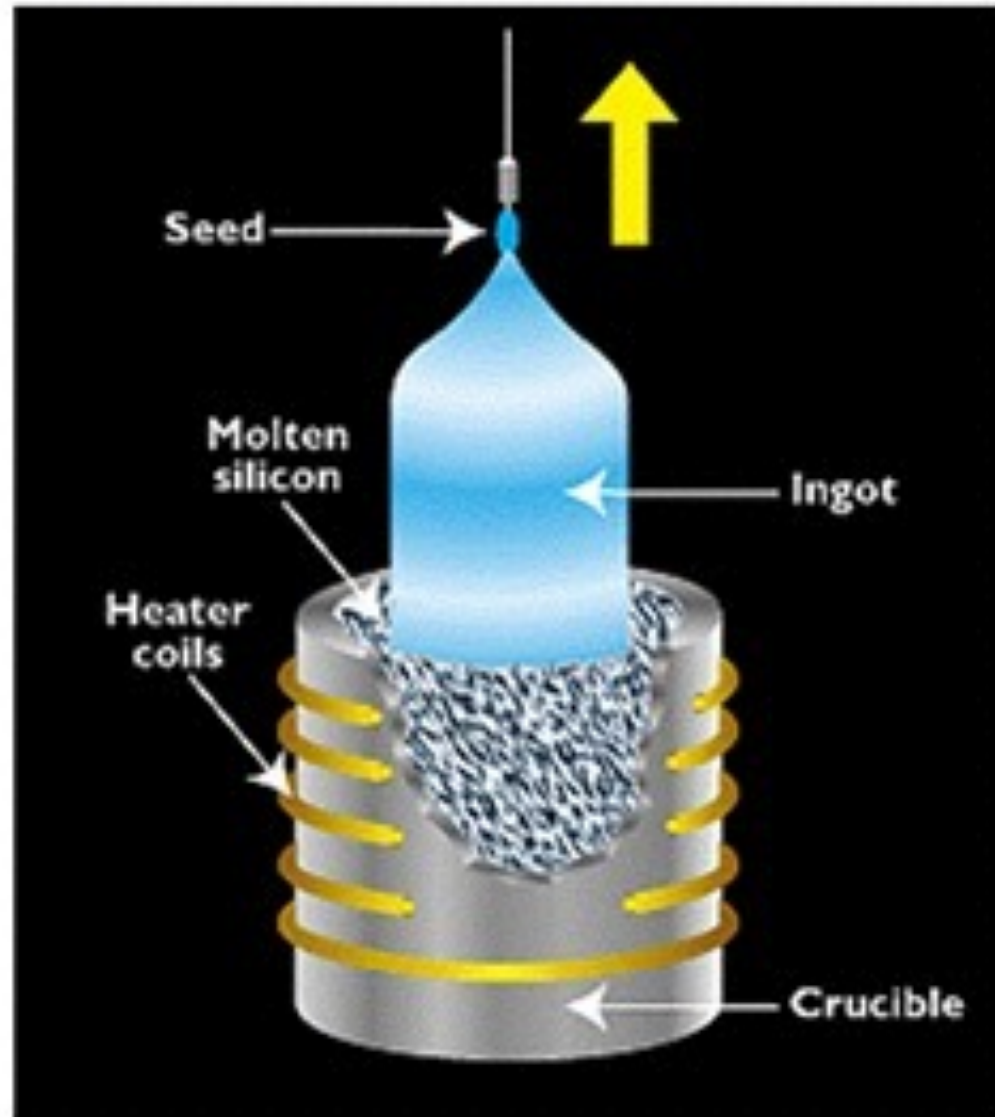
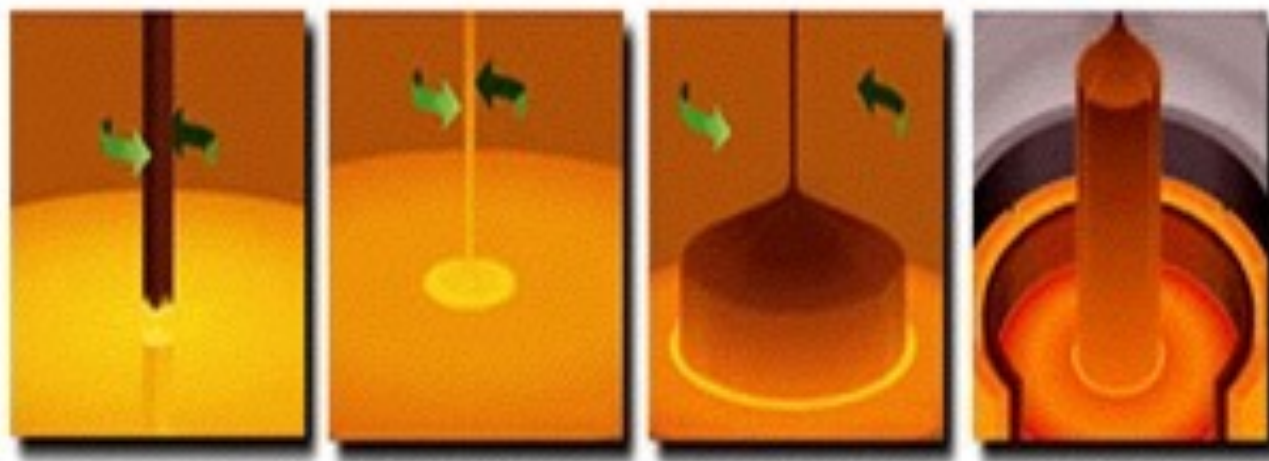
- ▶ 熱エネルギーにより自由になった電子は、価電子帯から伝導帯に励起されている。
- ▶ 電子が抜けた場所は、 $+$ の電気的性質を持つ正孔(ホール)ができる。
- ▶ 伝導帯にいる電子は電気を流す役割をする。
 - ▶ 電気を流す役割をするものをキャリアと呼ぶ
- ▶ 真性半導体の場合、電子と対となり正孔が電気を流す役割をするので、電子と正孔がキャリアとなる。

製造方法

- ▶ チョクラルスキー法（引き上げ法）
- ▶ るつぼの中にシリコン原材料を入れ加熱溶融する。
- ▶ 上から種結晶を下ろし、その先端を液状態のシリコンにつける。
- ▶ 種結晶を回転させ引き上げる。
(毎分1mm、10回転)



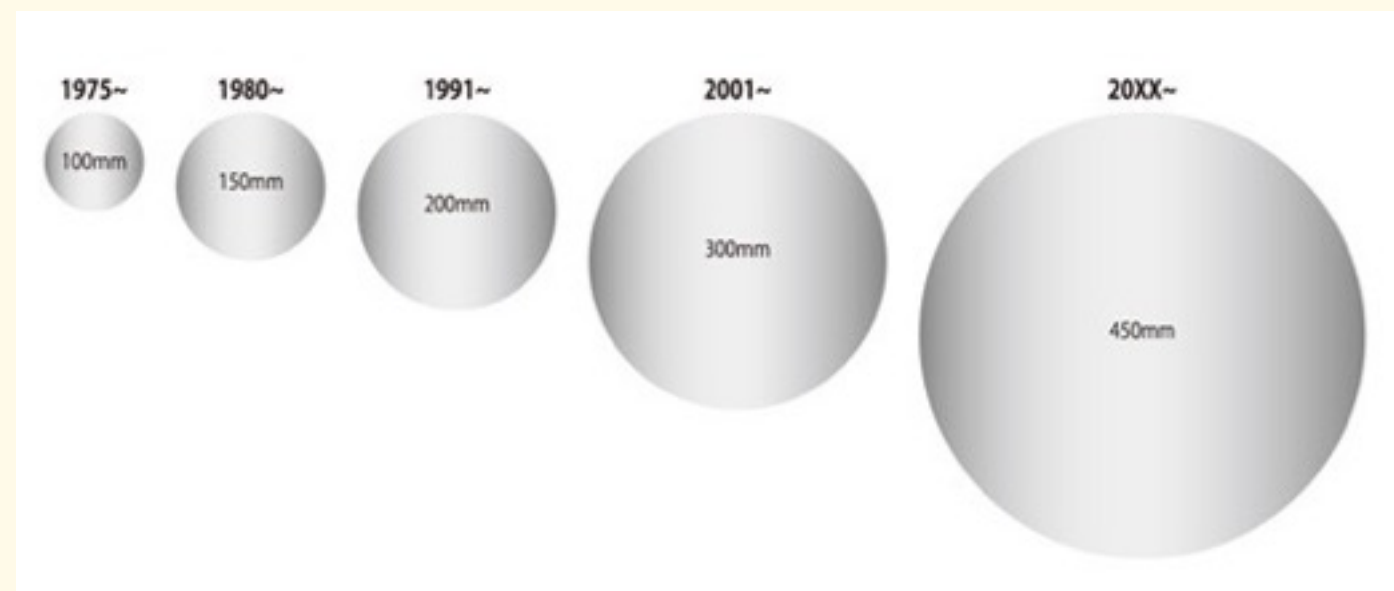
(豊田, 半導体の科学とその応用)



(<http://cnfolio.com/>)



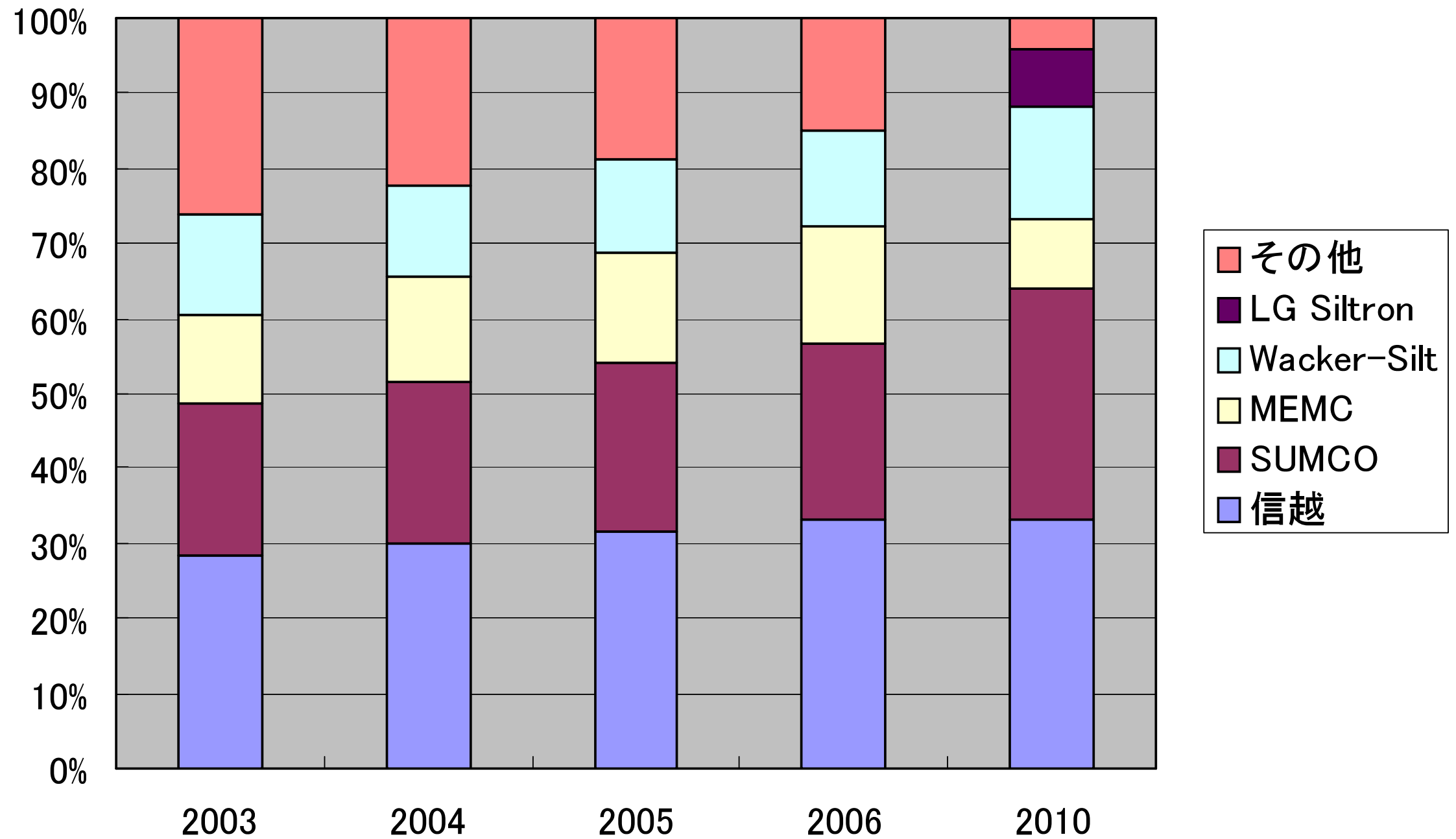
シリコンウェハのサイズ



(SUMCO)

シリコンウェーハのシェア

ウェハー市場マーケットシェア



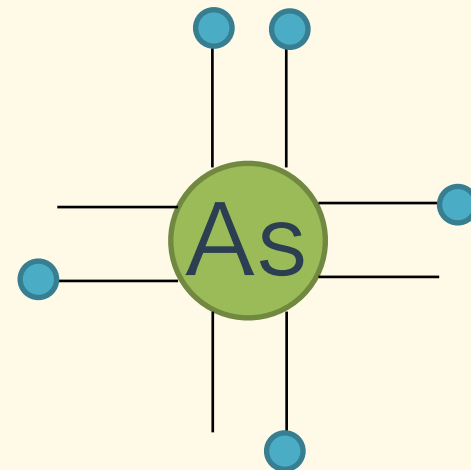
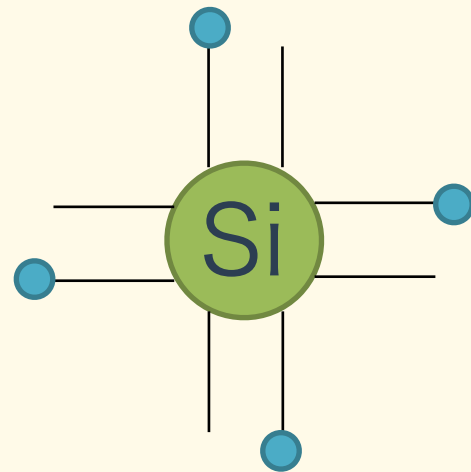
(国際半導体製造装置材料協会)

不純物半導体

- ▶ 真性半導体に微量の不純物を入れ（ドーブ）キャリアを作ることができる（ドーピング）。このようにして作った半導体を不純物半導体（外因性半導体）という。

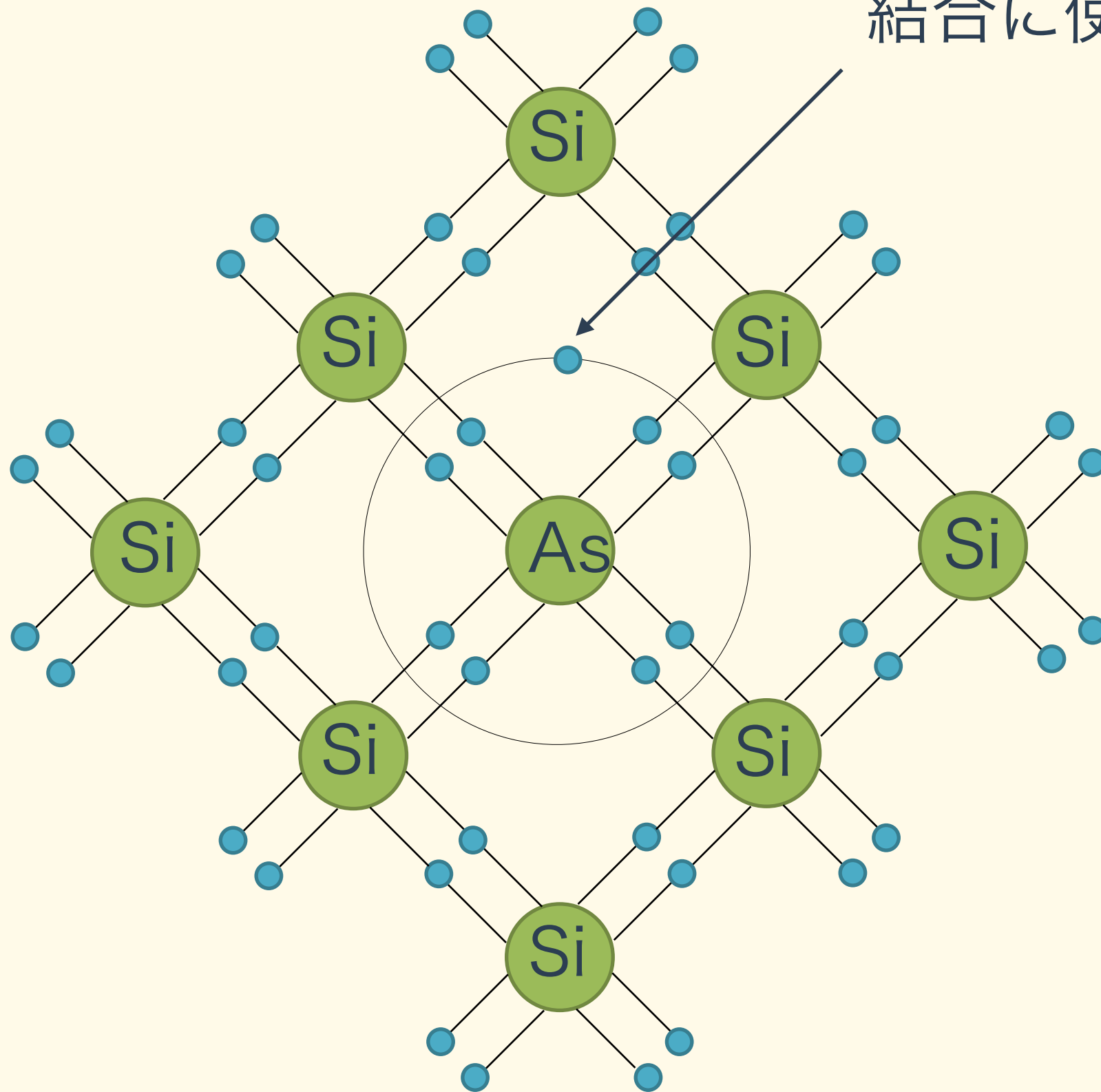
n型半導体

- ▶ 真性半導体に5価の不純物（最外殻電子が5個）をドープする。
- ▶ 不純物をドナー不純物という。

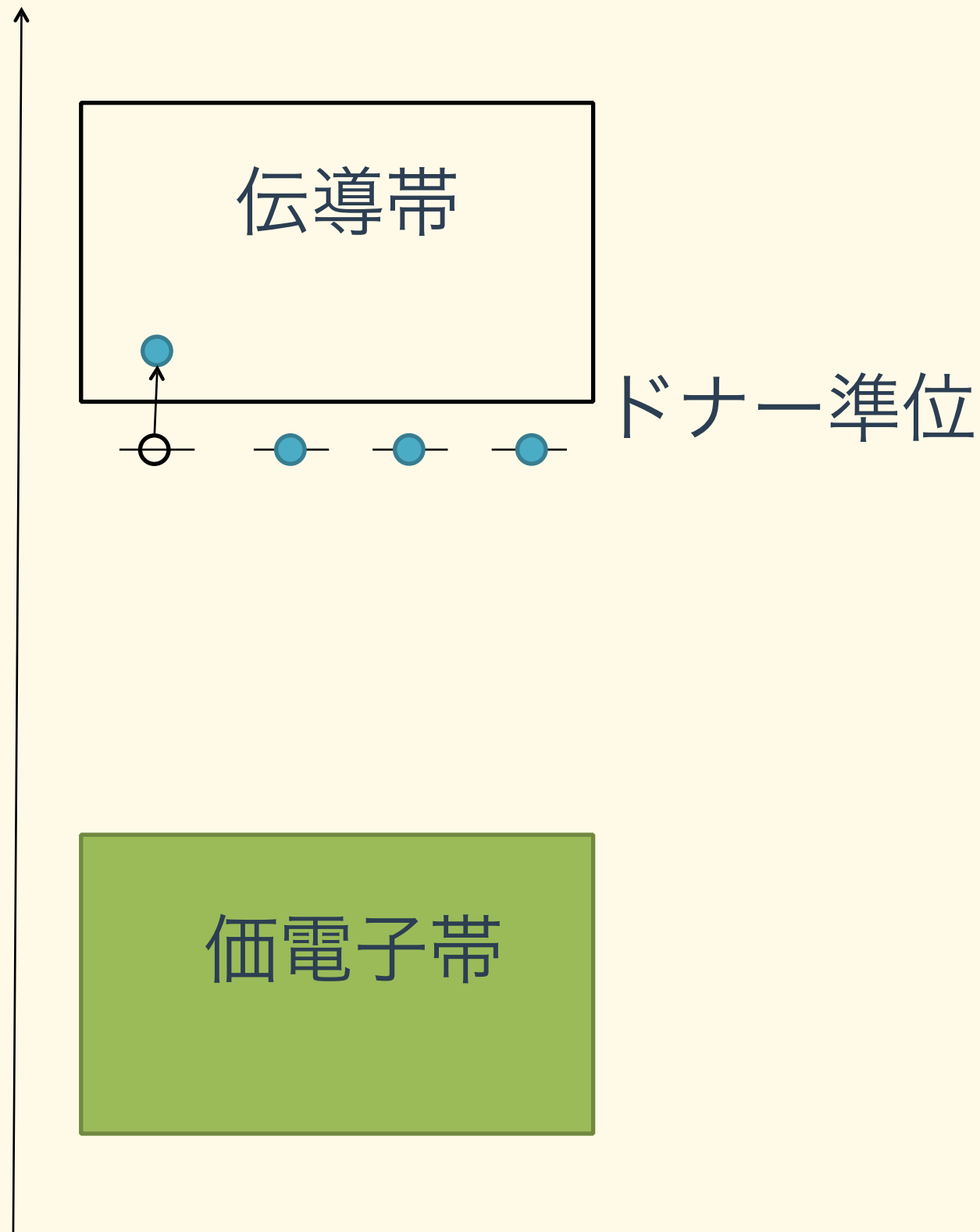


シリコンは最外殻電子が4つ ヒ素は最外殻電子が5つ

結合に使われない電子



結合には4つの電子があれば良いので、電子はひとつ余る。結合に使われない余った電子がキャリアとなる。

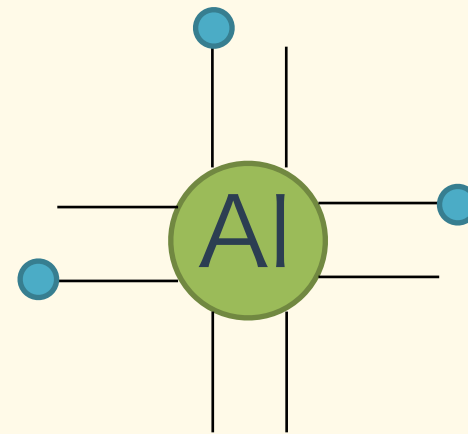
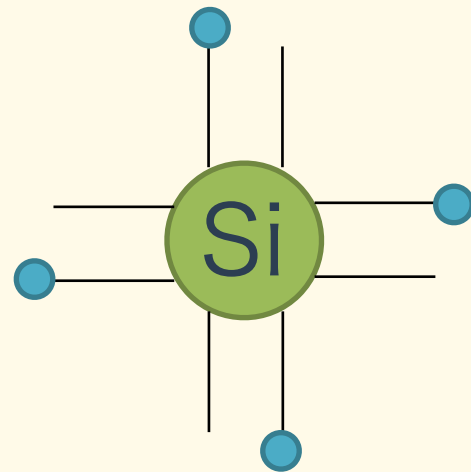


結合に使われな
い余った電子は、
ドナー準位とよ
ばれるエネルギー
準位を形成する。

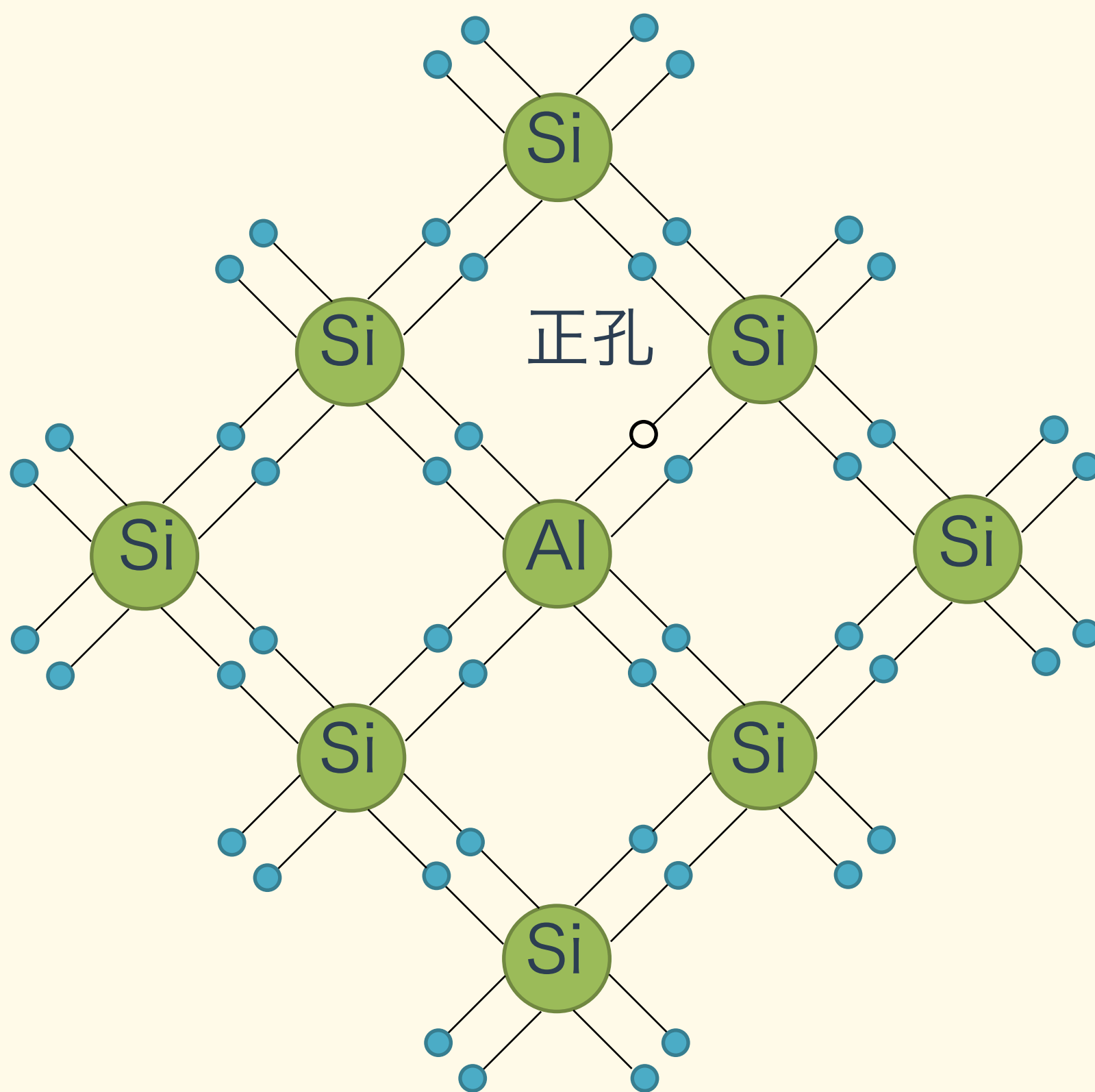
ドナー準位にあ
る電子は僅かな
熱エネルギーで
励起され、伝導
電子になる。

p型半導体

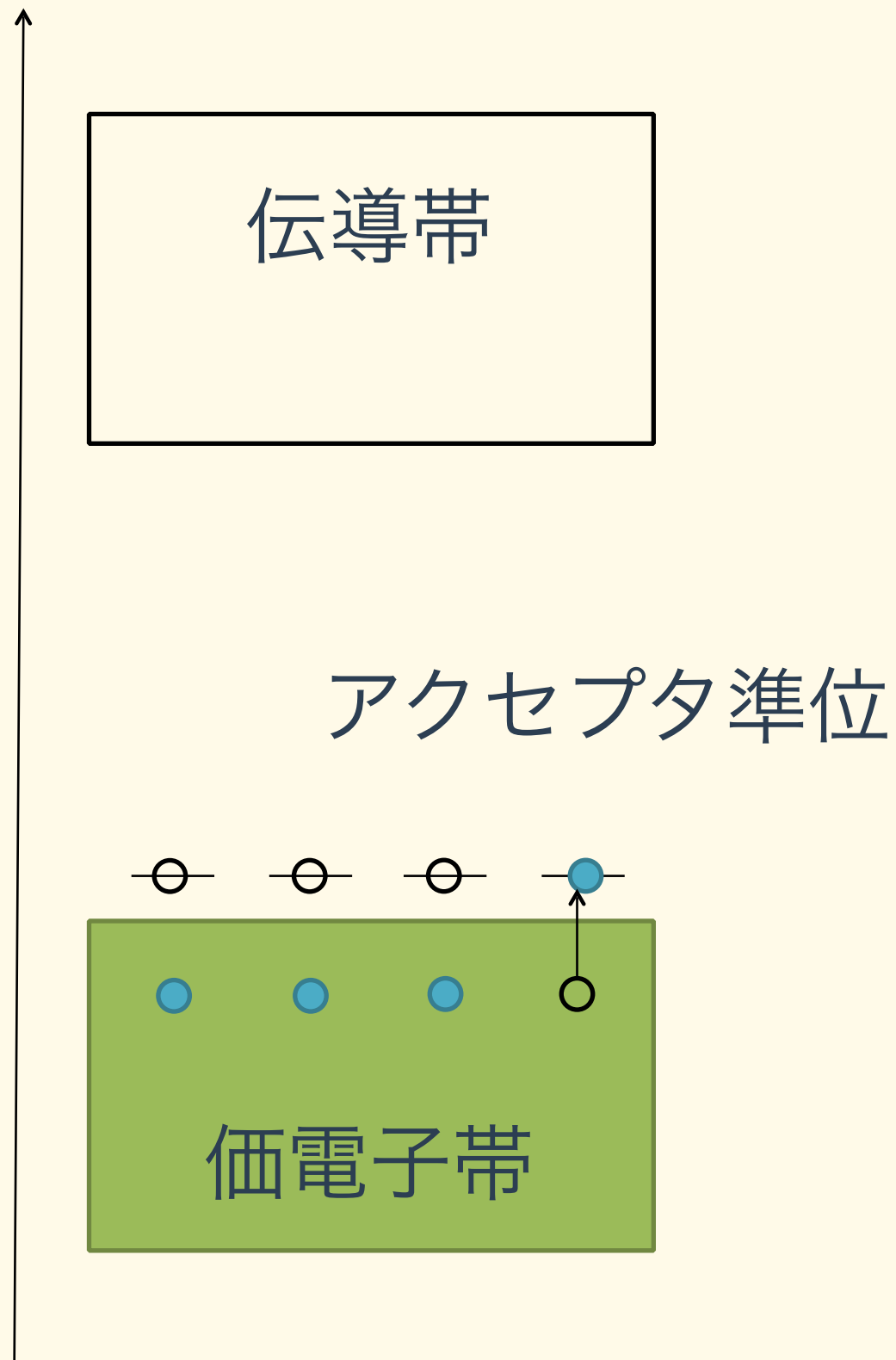
- ▶ 真性半導体に3価の不純物（最外殻電子が3個）をドープする。
- ▶ 不純物をアクセプタ不純物という。



シリコンは最外殻電子が4つ アルミニウムは最外殻電子が3つ



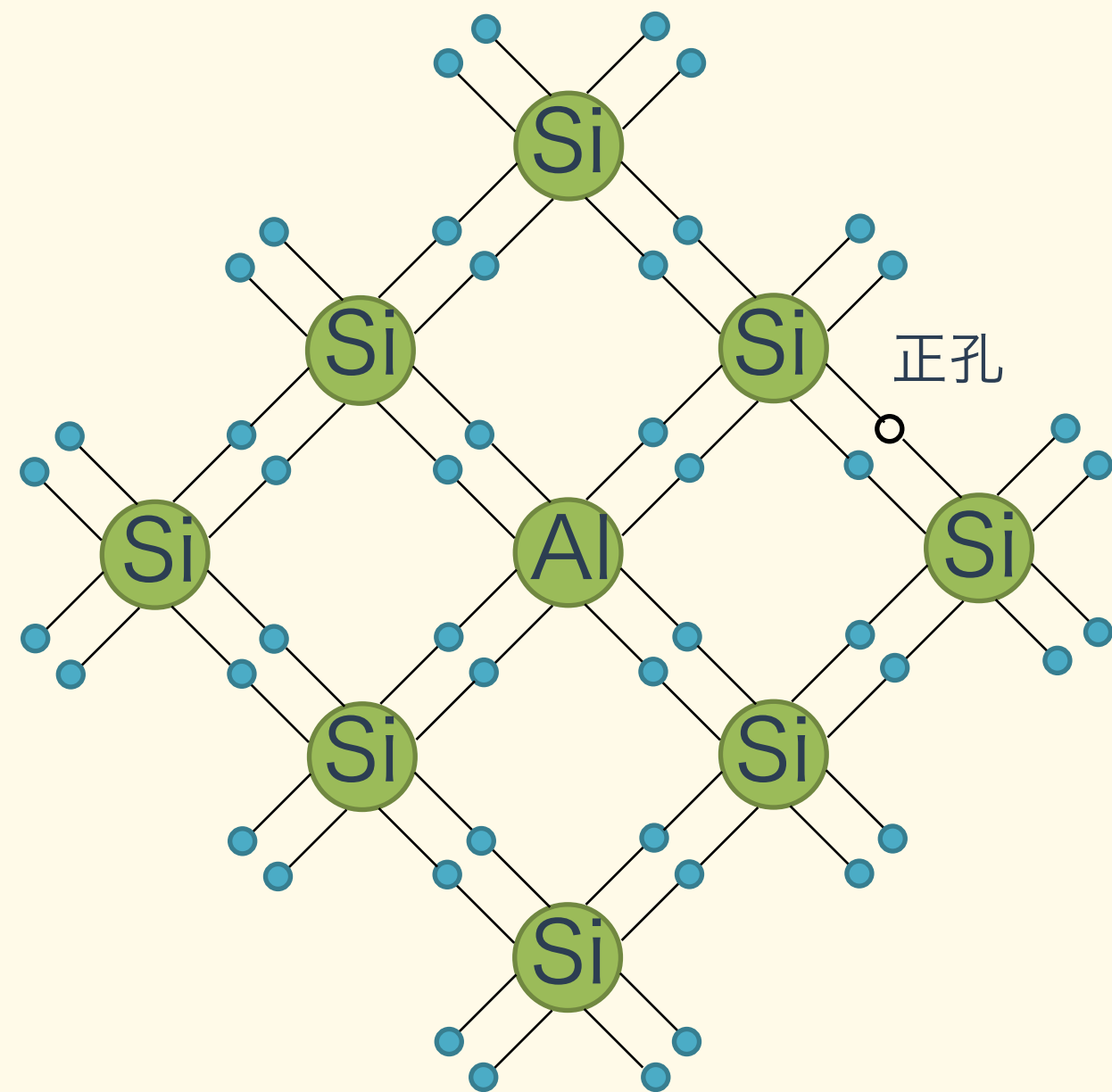
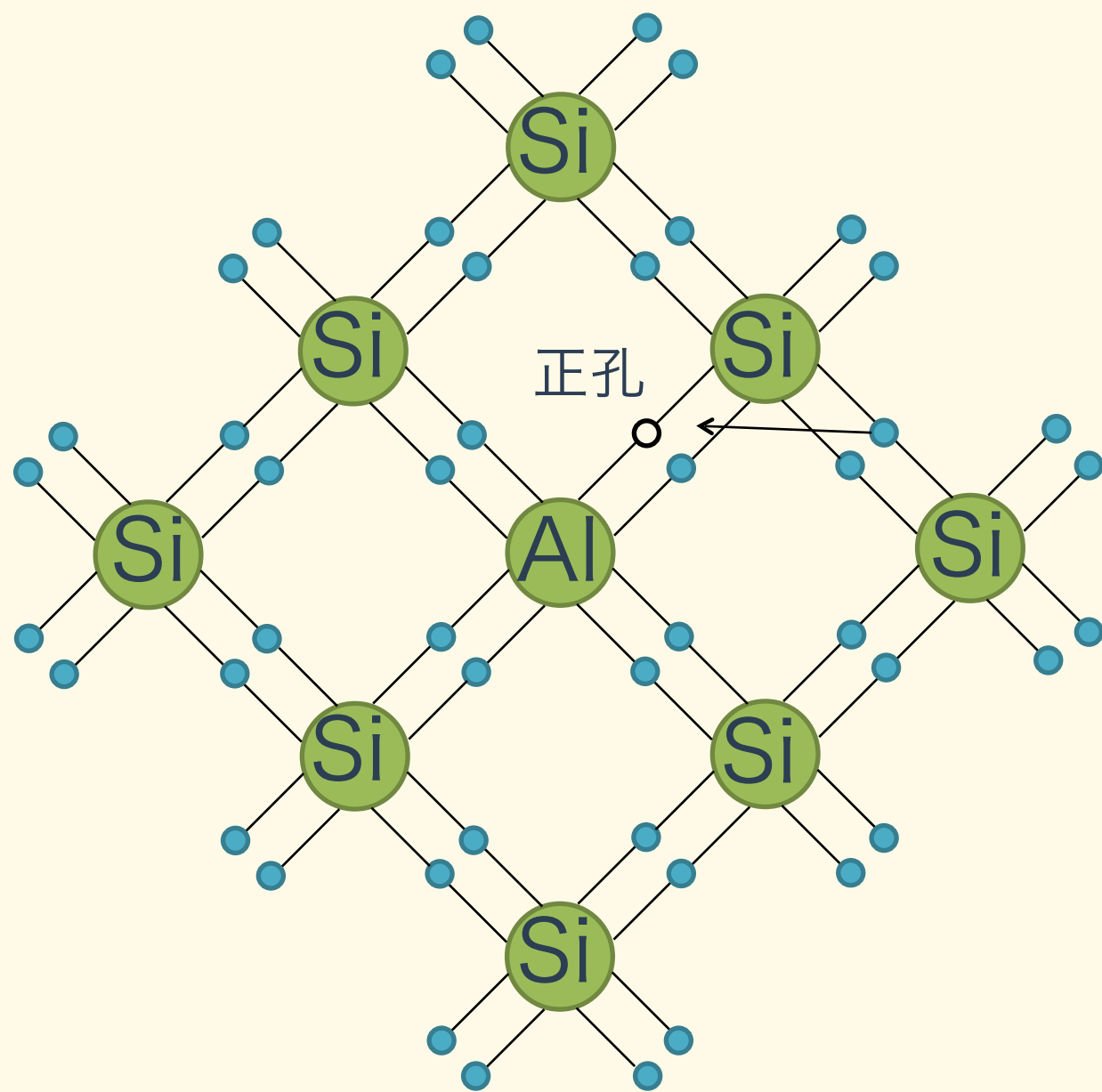
3価の原子を使ったため、電子が足りない状況になる。足りない場所は+の電氣的性質を持ったあな（正孔、ホール）となる。この正孔が電気を流すキャリアとなる。



アクセプタ不純物が作るエネルギー準位をアクセプタ準位という。

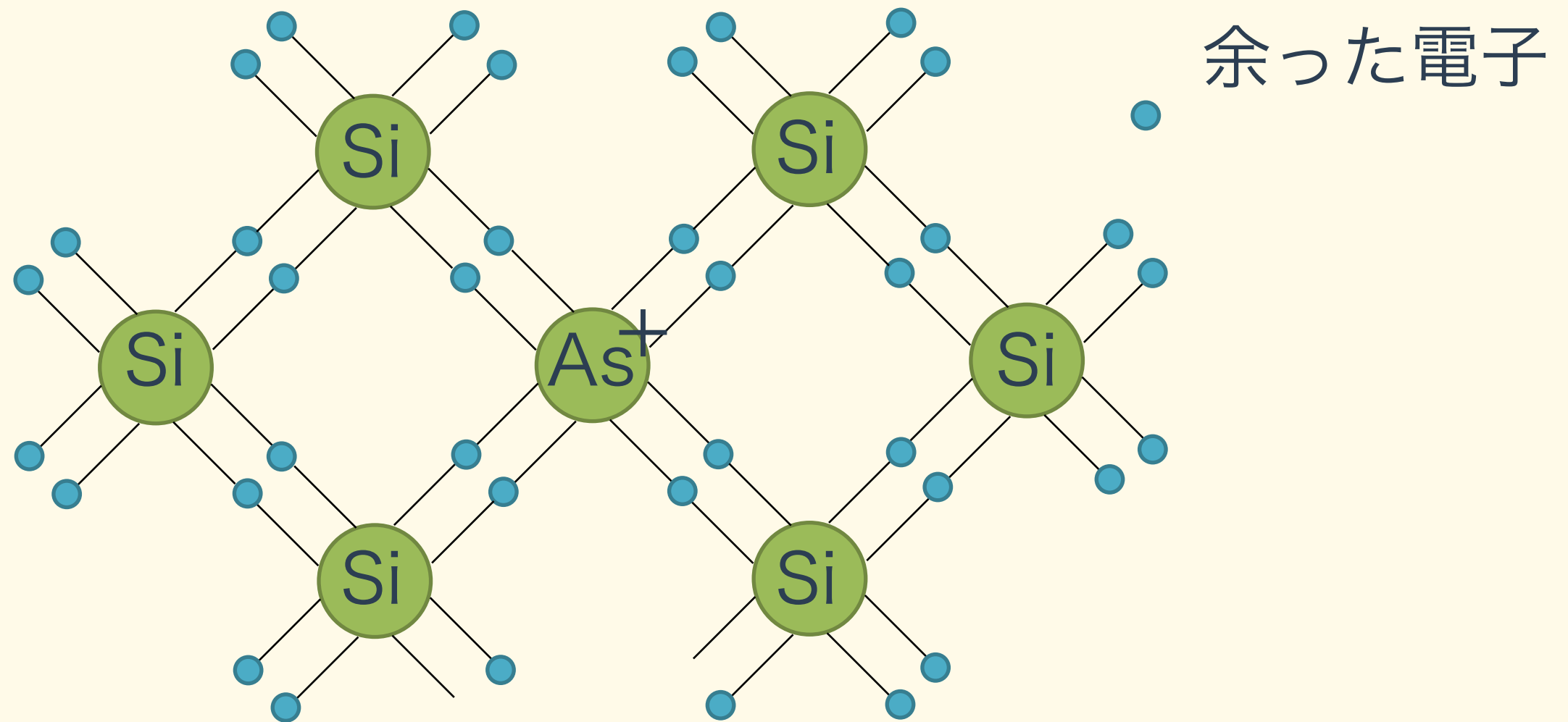
電子は熱によりアクセプタ準位励起される。その結果価電子帯に正孔が形成される。

これは、結晶の結合手から電子が次々と正孔を埋めていくことに対応する。



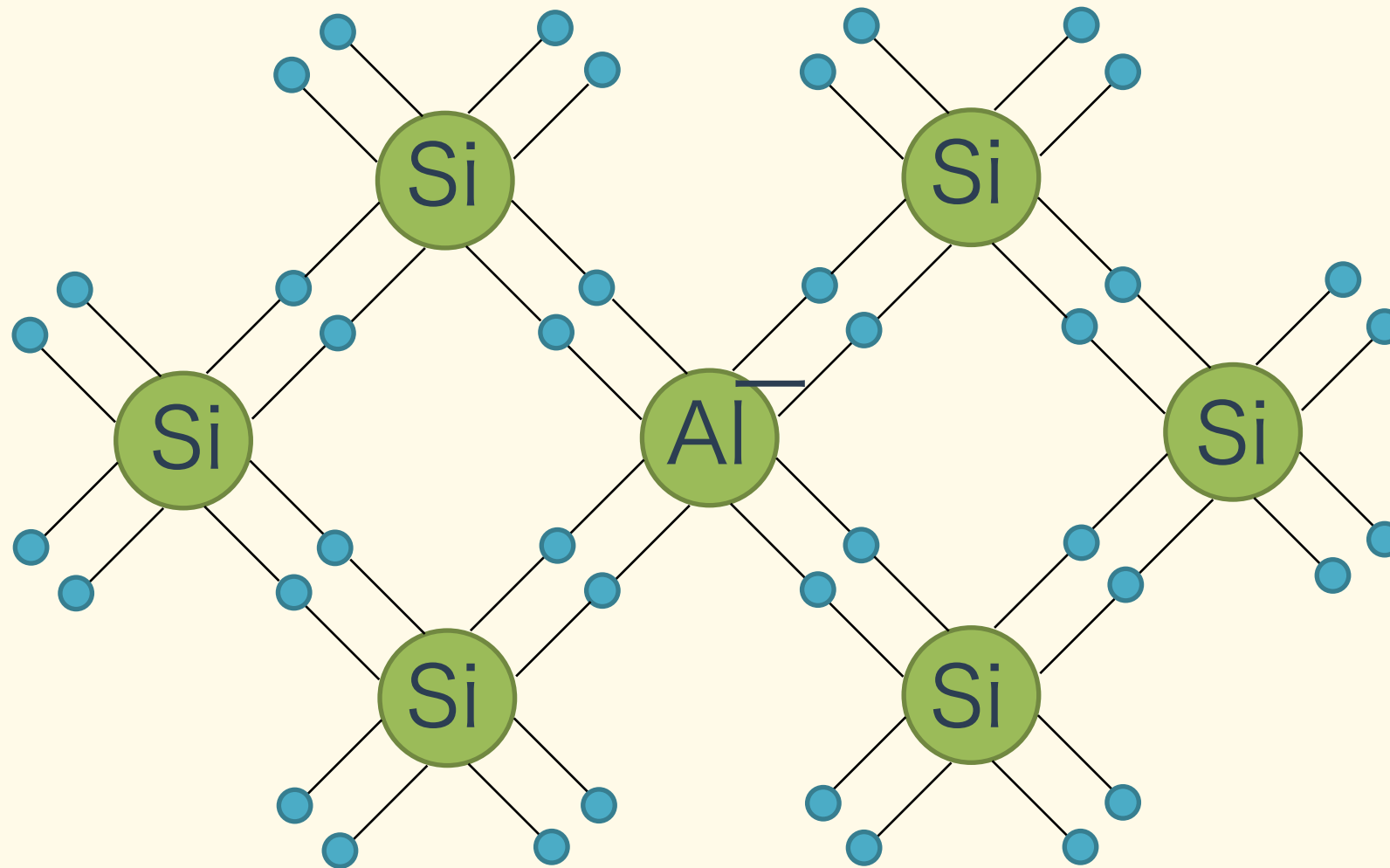
椅子取りゲームのように正孔に電子が移動する。結果として正孔は結晶内を移動することになる。

ドナーイオン



ドナーから余った電子が遠くへ行ってしまうと、ドナーは電氣的には+となる（イオン化される）。イオン化されたドナーをドナーイオンと呼ぶ。

アクセプタイオン



正孔に電子が入ってしまうと、アクセプタ不純物は電氣的に一になる。イオン化されたアクセプタ不純物をアクセプタイオンと呼ぶ。

多数キャリア

- ▶ 実際には、n型半導体、p型半導体にも電子とホールの両方のキャリアが存在している.
- ▶ 半導体の中のキャリアとして、圧倒的に多い方を多数キャリア、少ない方を少数キャリアと言う.
- ▶ n型半導体の場合、電子が多数キャリア
- ▶ p型半導体の場合、ホールが多数キャリア

キャリア濃度

ホール効果

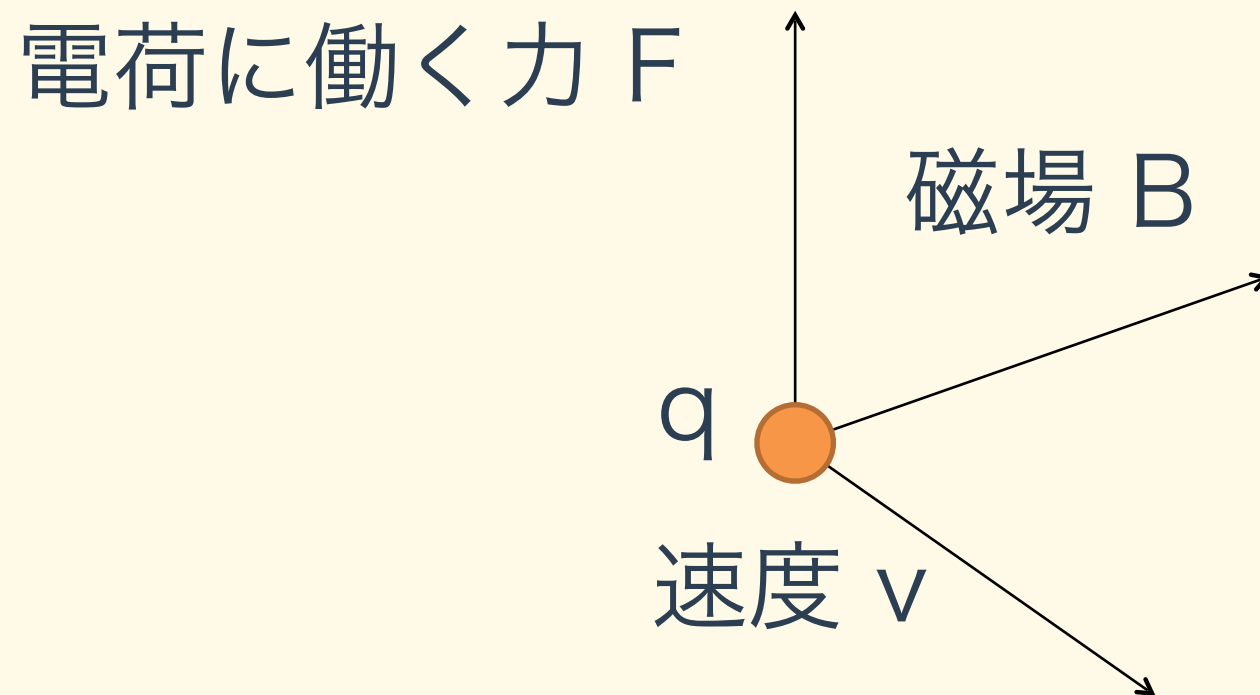
- ▶ キャリアの密度を測るために用いられる物理現象
- ▶ まずはホール効果を理解するために電子が磁場から受ける影響について学ぶ.

磁場

- ▶ 電場が電子の周りにできたのに対し、磁場は磁石の周りにできる.
- ▶ 磁場は電流により発生する.
- ▶ 電荷に対応した磁荷は存在しない.
- ▶ 磁場の強さを表す物理量の一つが磁束密度 B

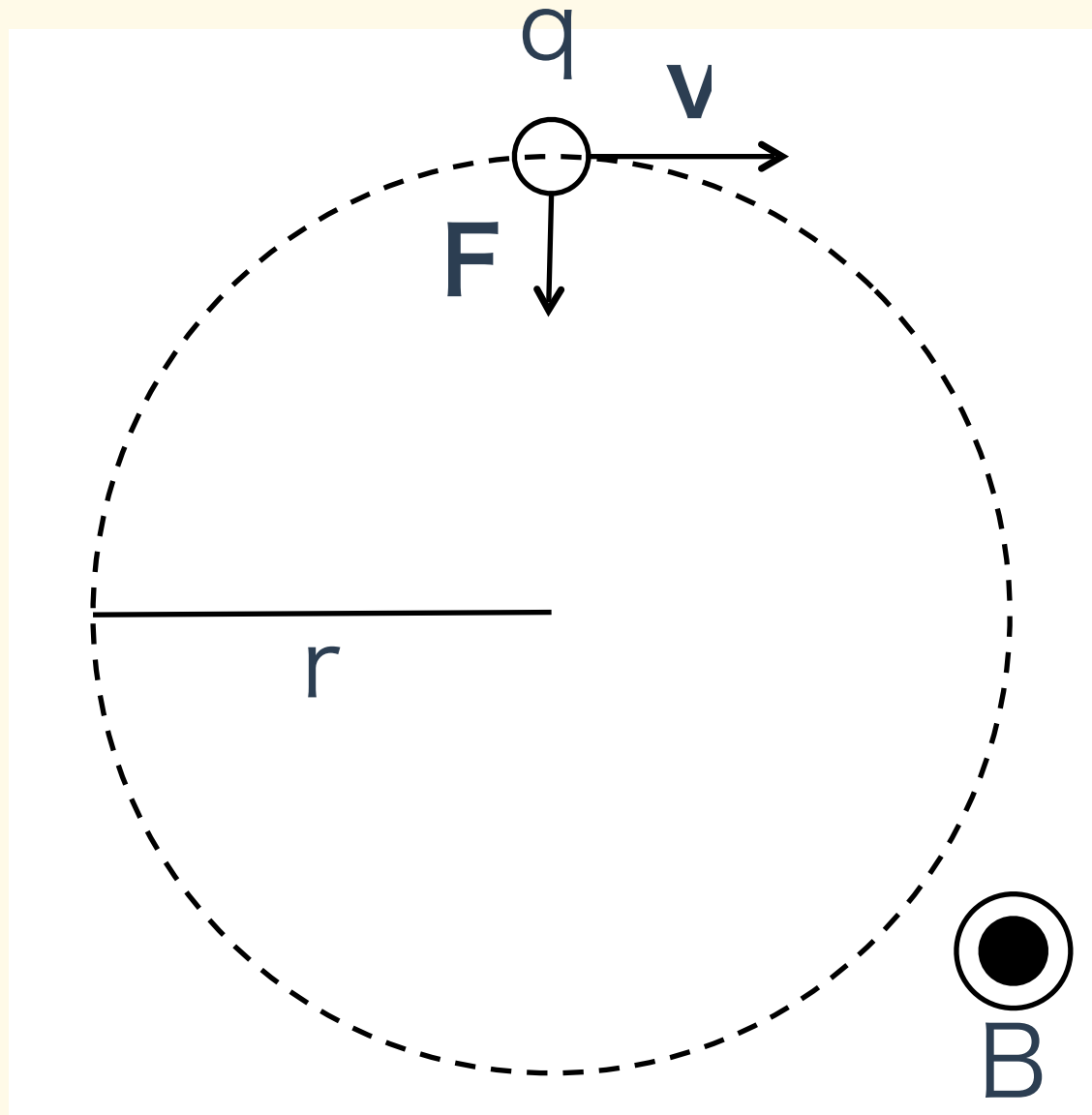
磁場の影響を受ける電荷

運動する電荷は磁場の影響を受ける。

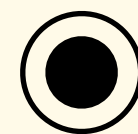
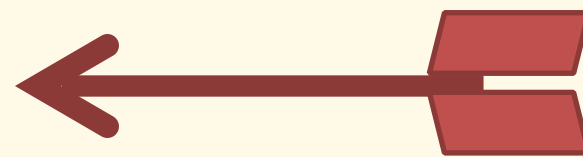


$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

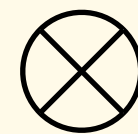
磁場中の電荷の動き



- 磁場中を移動する電荷は進行方向に対し垂直な力を受ける
- 進行方向に対し垂直な力は向心力となり円運動をする

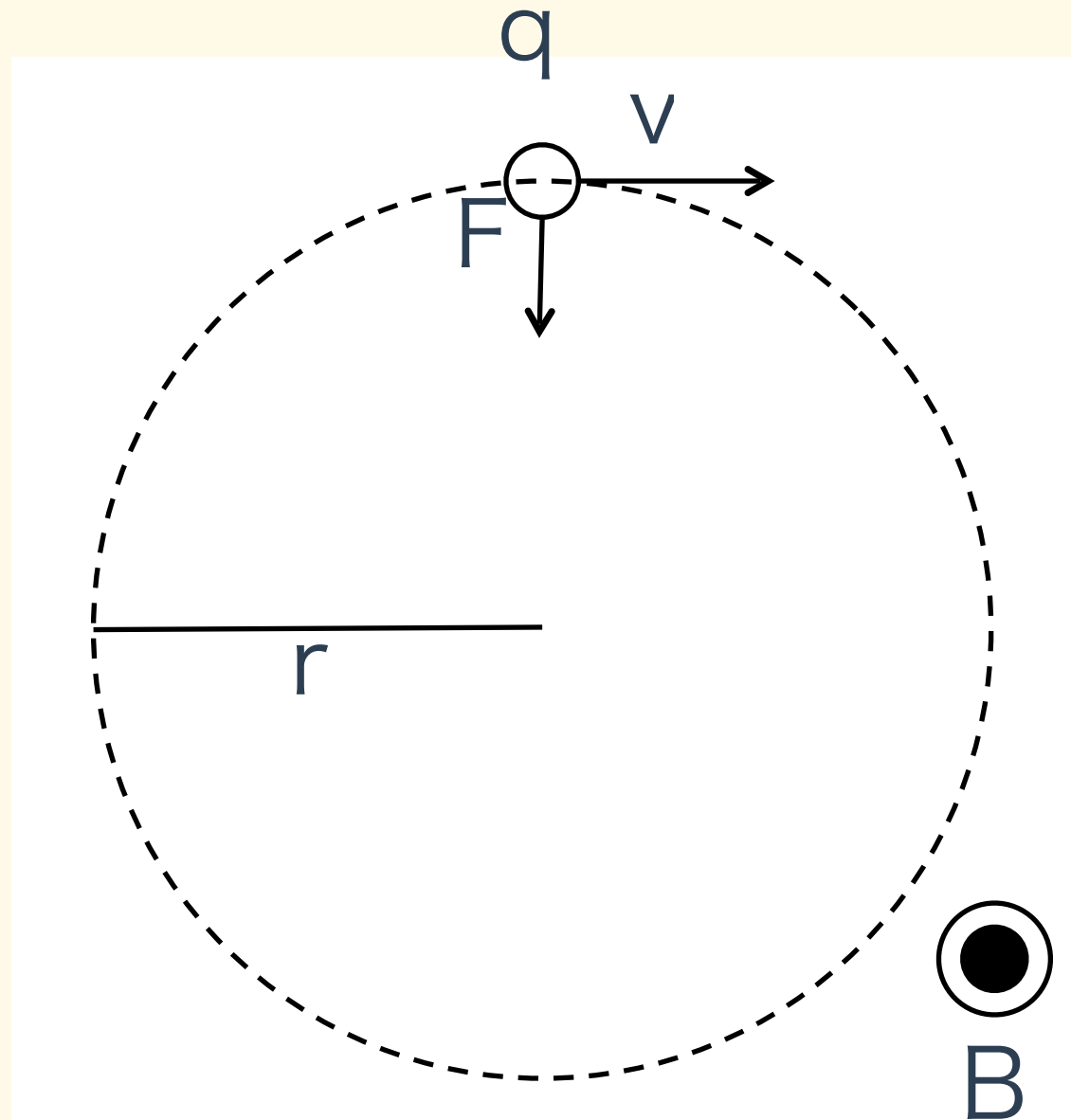


画面から垂直に出ている



画面に向かって垂直に入っている

磁場中の電荷の動き



磁場から受ける力が向心力となるので

磁場による力

$$F = qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$r = \frac{mv}{qB}$

向心力

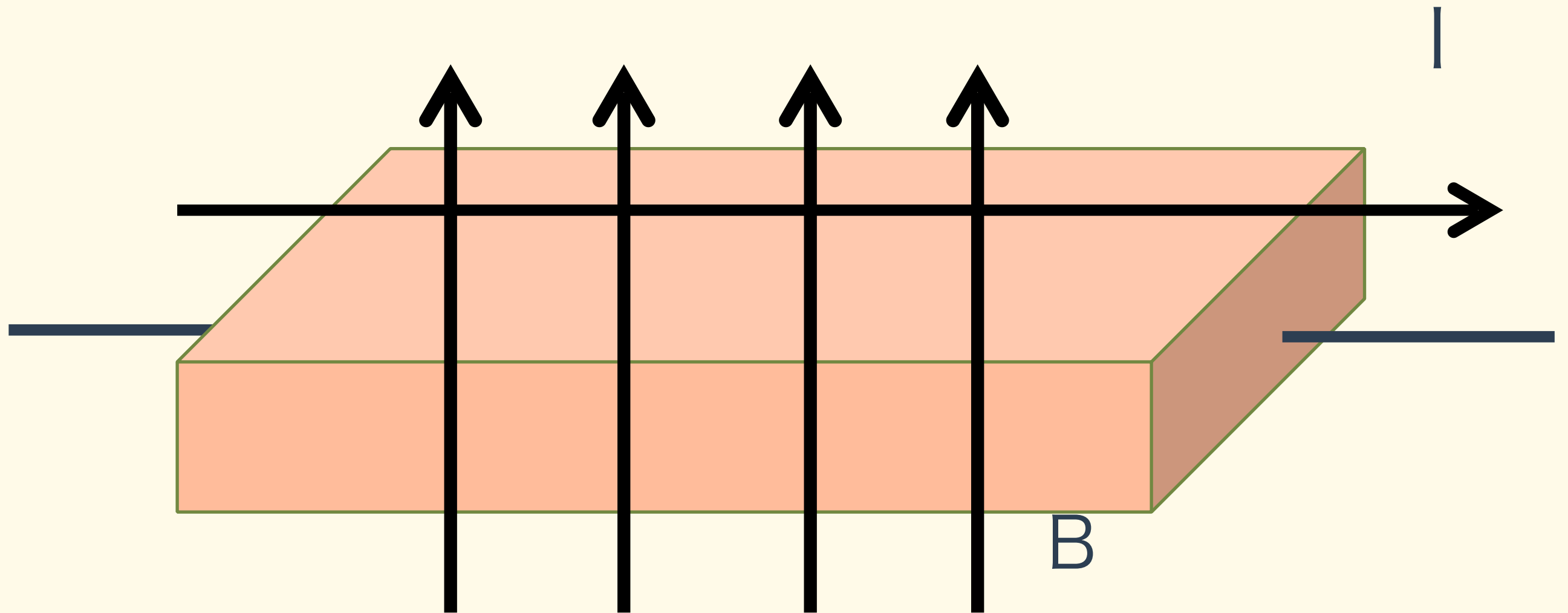
ローレンツ力

- ▶ 電荷が受ける力は電場からのものと、磁場からのものがある。
- ▶ それをローレンツ力という。

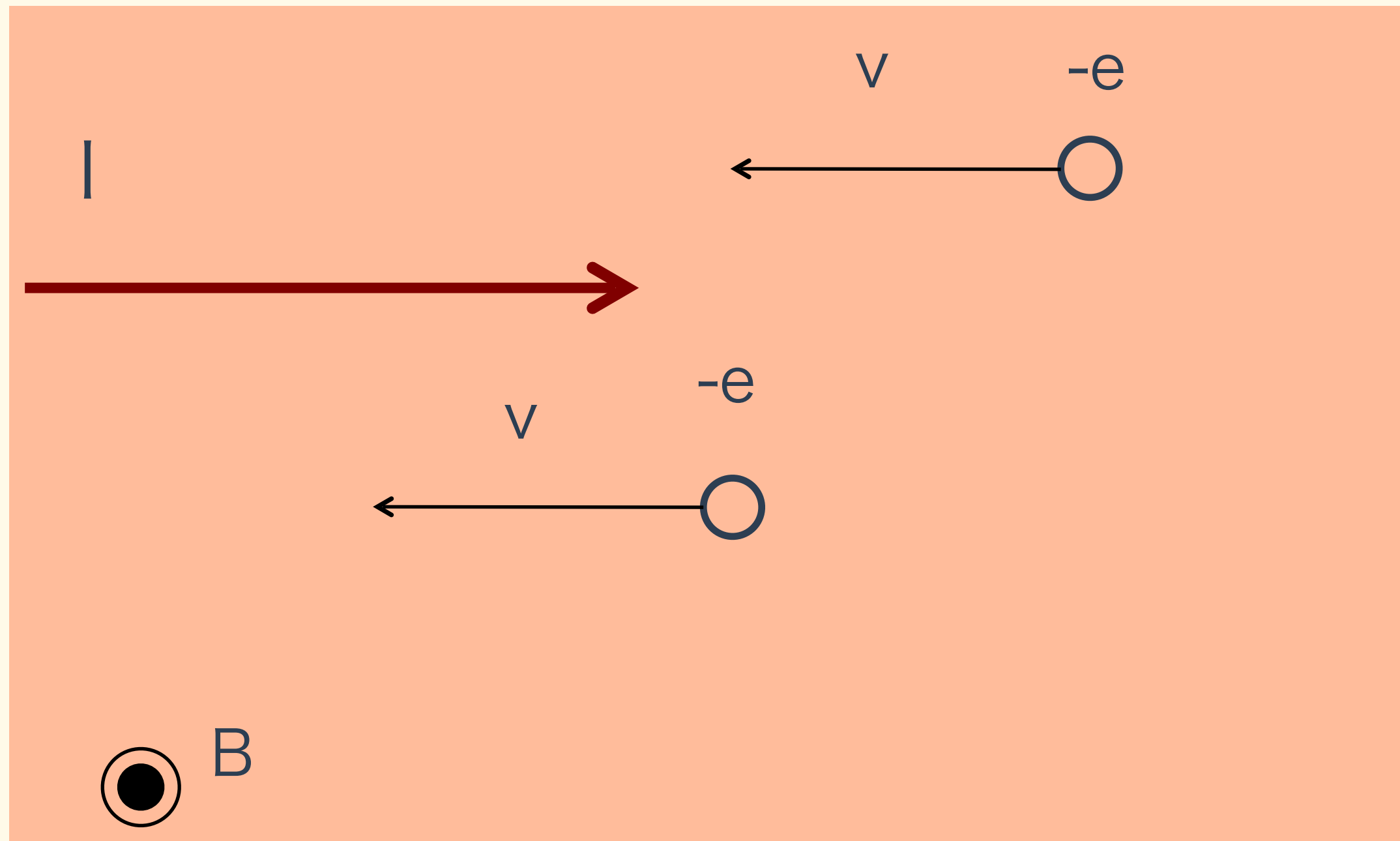
$$\mathbf{F} = \underbrace{q\mathbf{E}}_{\text{電場から受ける力}} + \underbrace{q\mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{磁場から受ける力}}$$

ホール効果

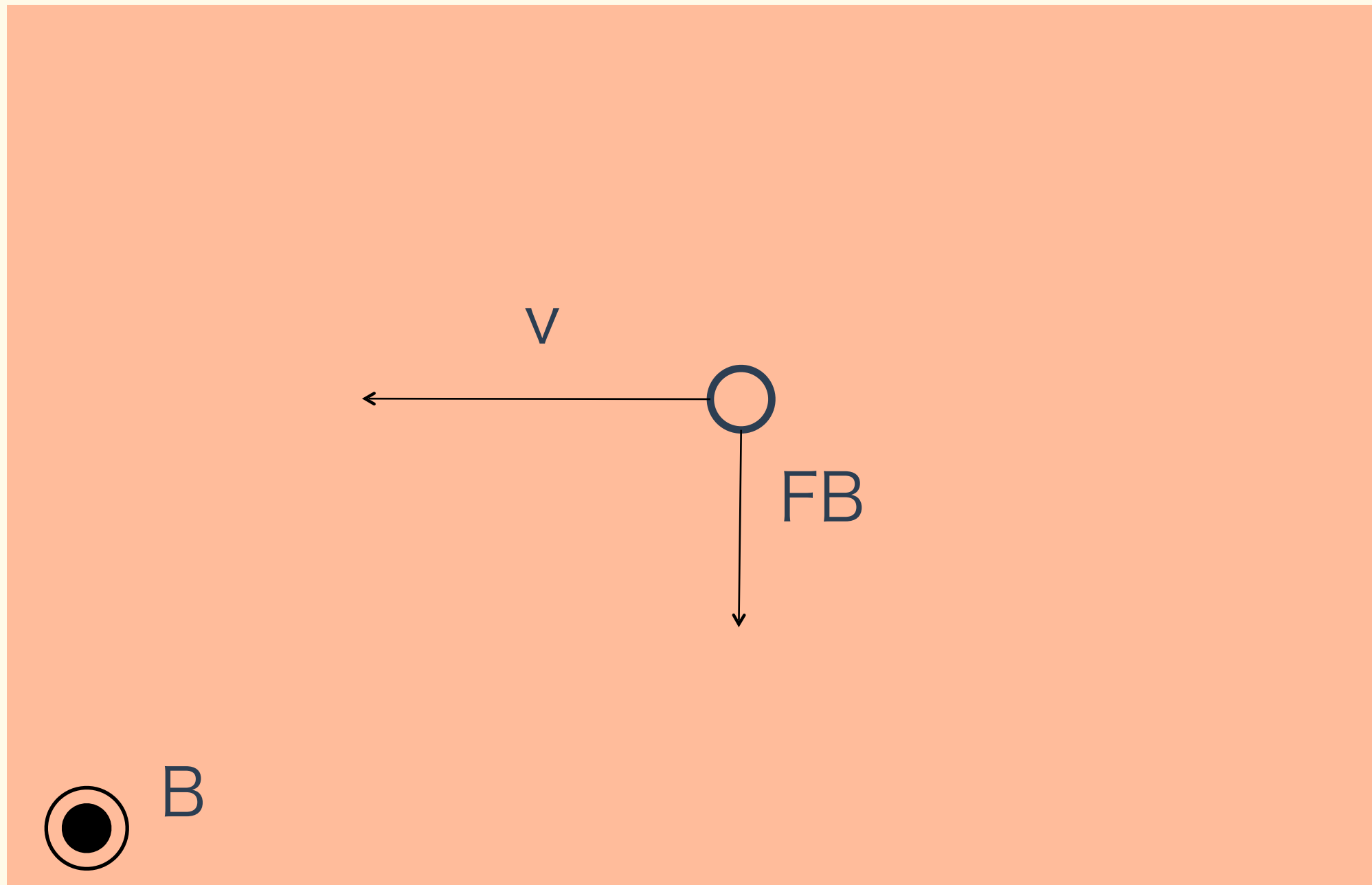
電流に対し垂直に磁場をかけると、電流が曲がる。
曲がることで、電荷の偏りが生じ起電力が発生する。



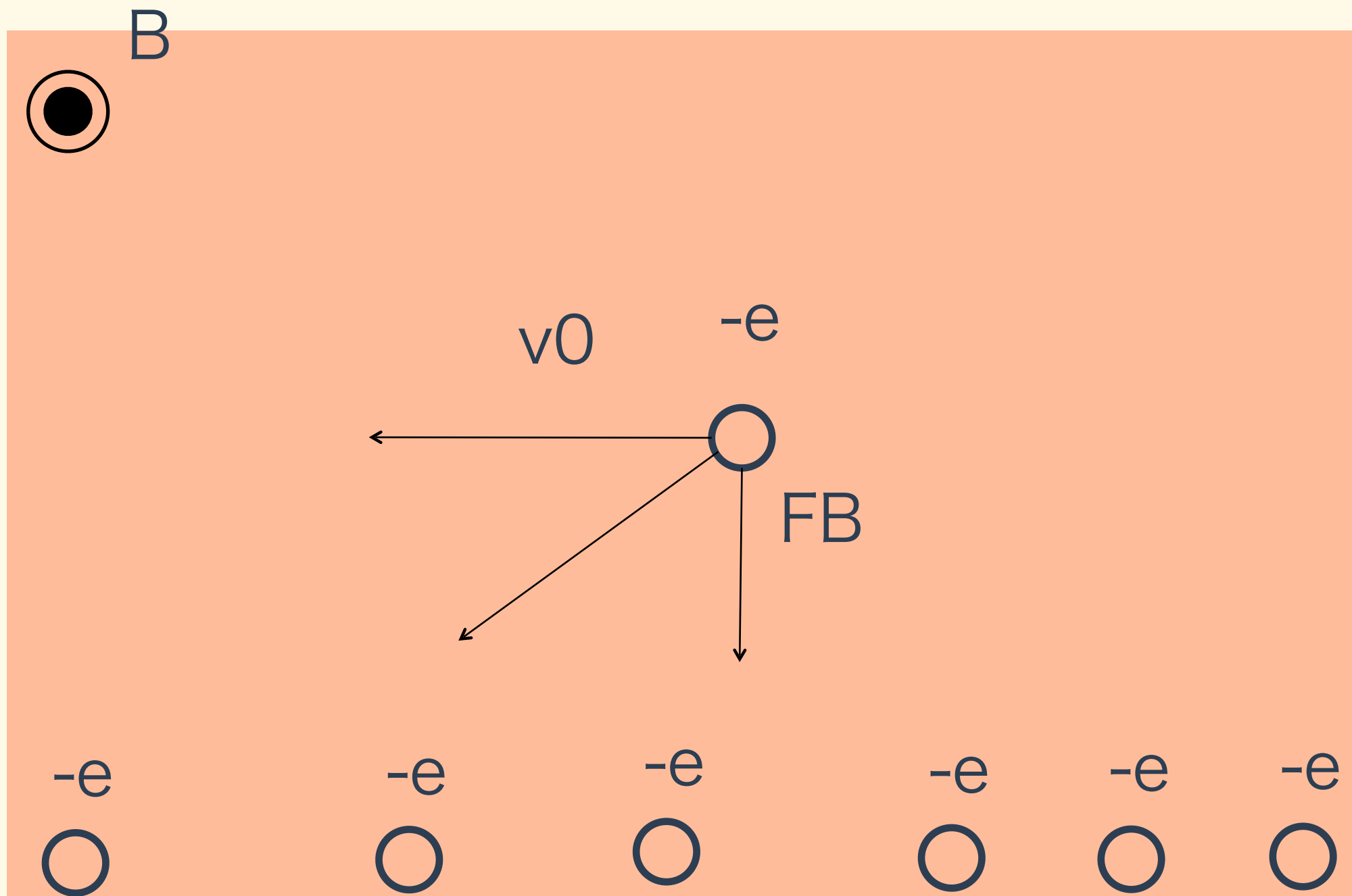
原理



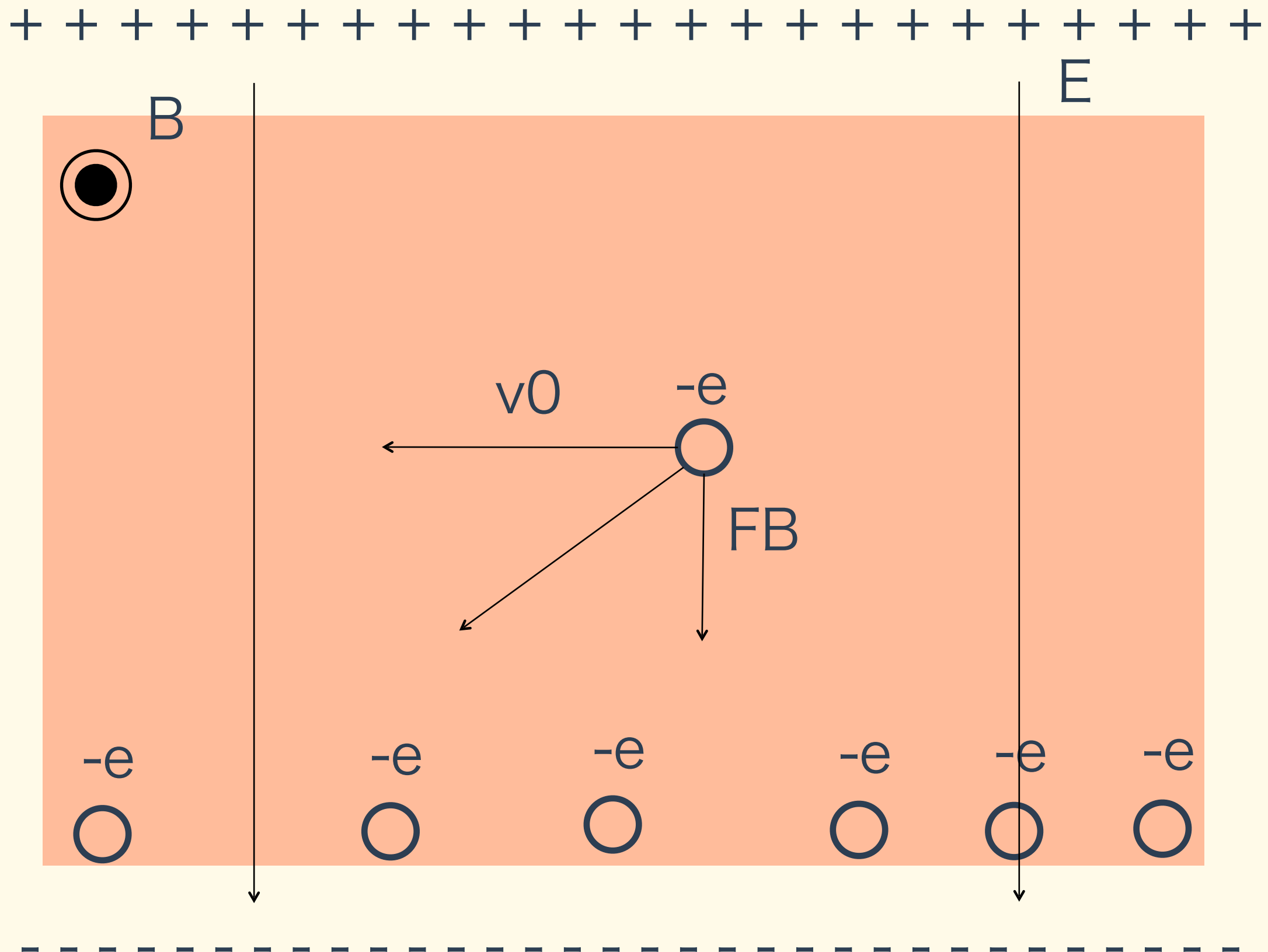
動いている電子は磁場から力を受ける



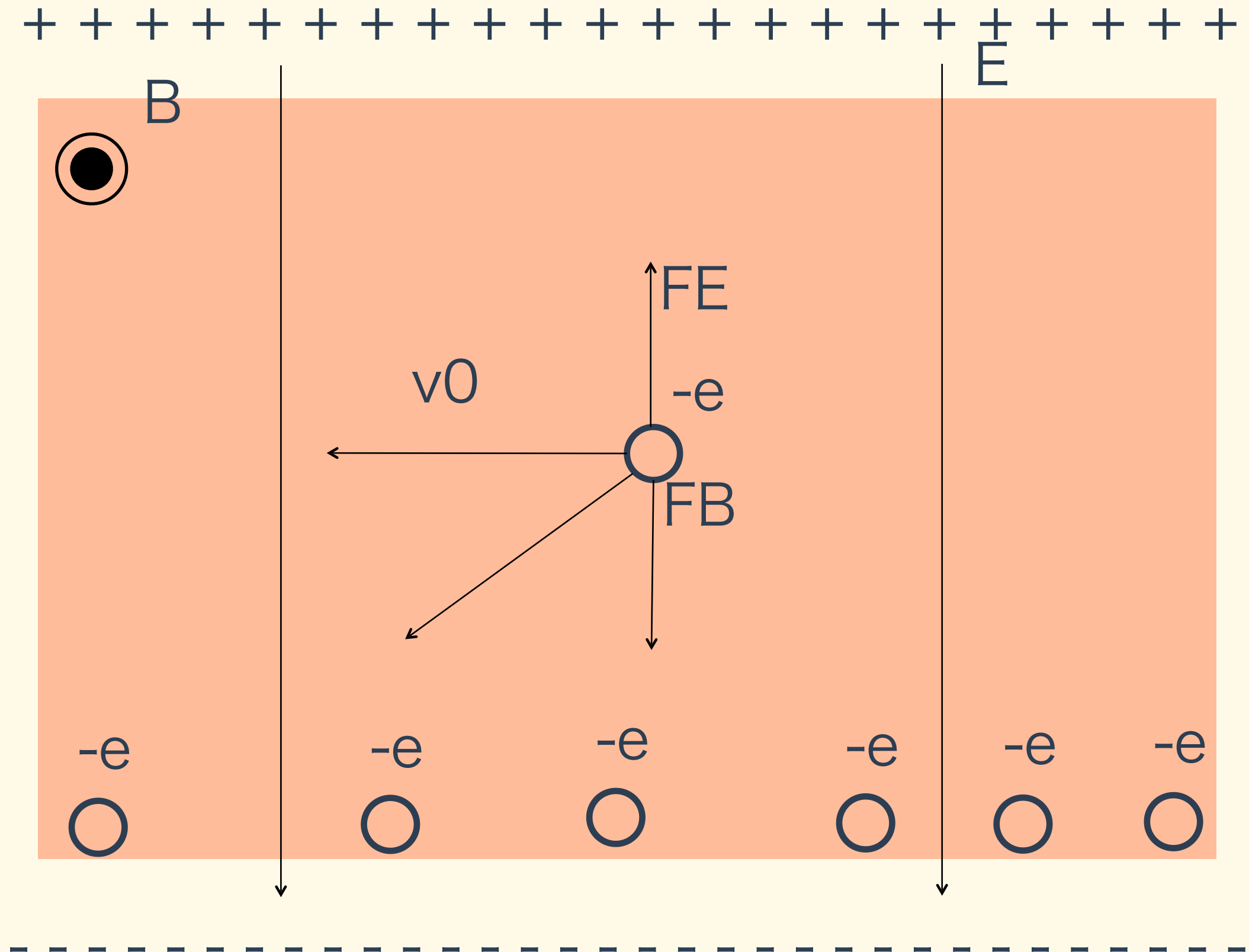
電子は曲がり、端に溜まってくる



端に溜まった電子により電場Eが生じる



磁場から受ける力と電場から受ける力が釣り合い電子は直進する。



数式で表すと

- ▶ 電流密度は

$$\dot{i} = qnv$$

i: 電流密度

q: 電荷

n: 電荷密度

v: 速度

- ▶ 電場と磁場による力は釣り合うので

$$F_B = F_E$$

$$qvB = qE$$

$$v = \frac{E}{B}$$

$$i = qn \frac{E}{B}$$

$$E = R_H i B$$

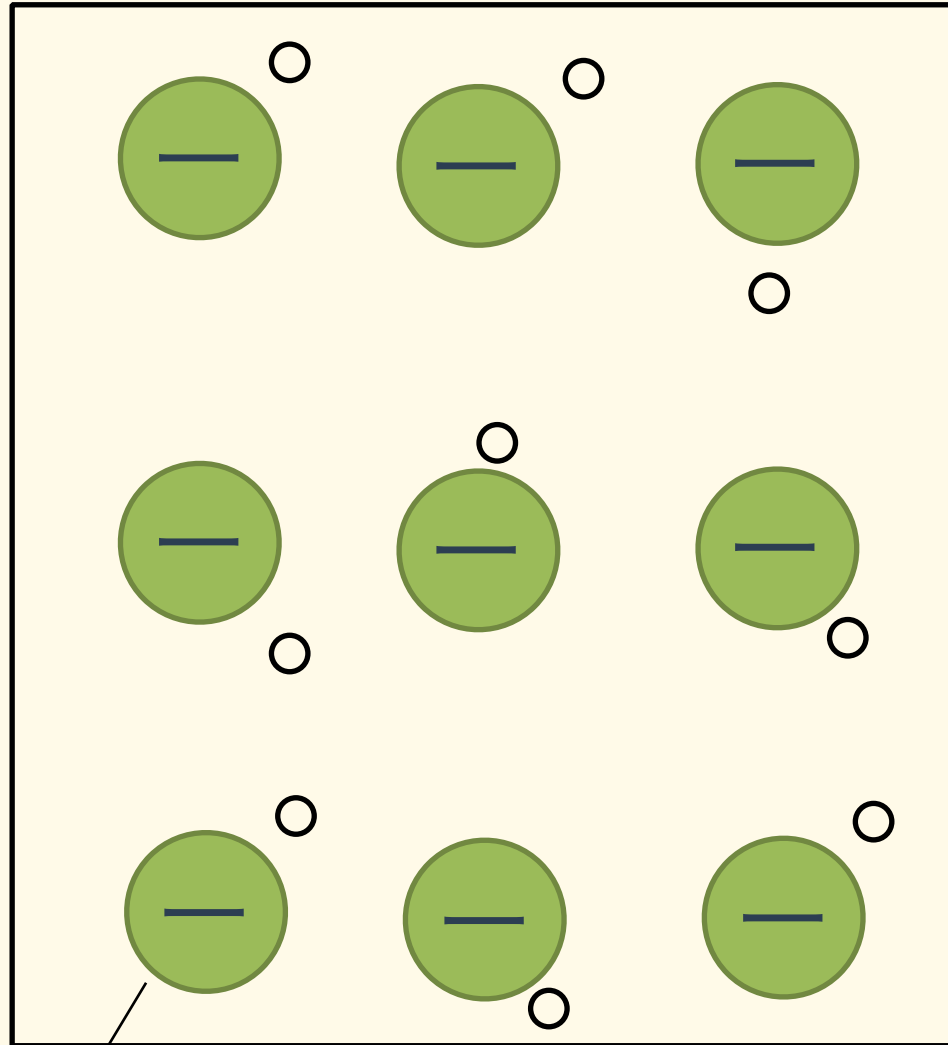
$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \text{ホール定数}$$

ホール効果を用いることで、電流に寄与する電荷(キャリア)の密度を知ることができる。

pn接合

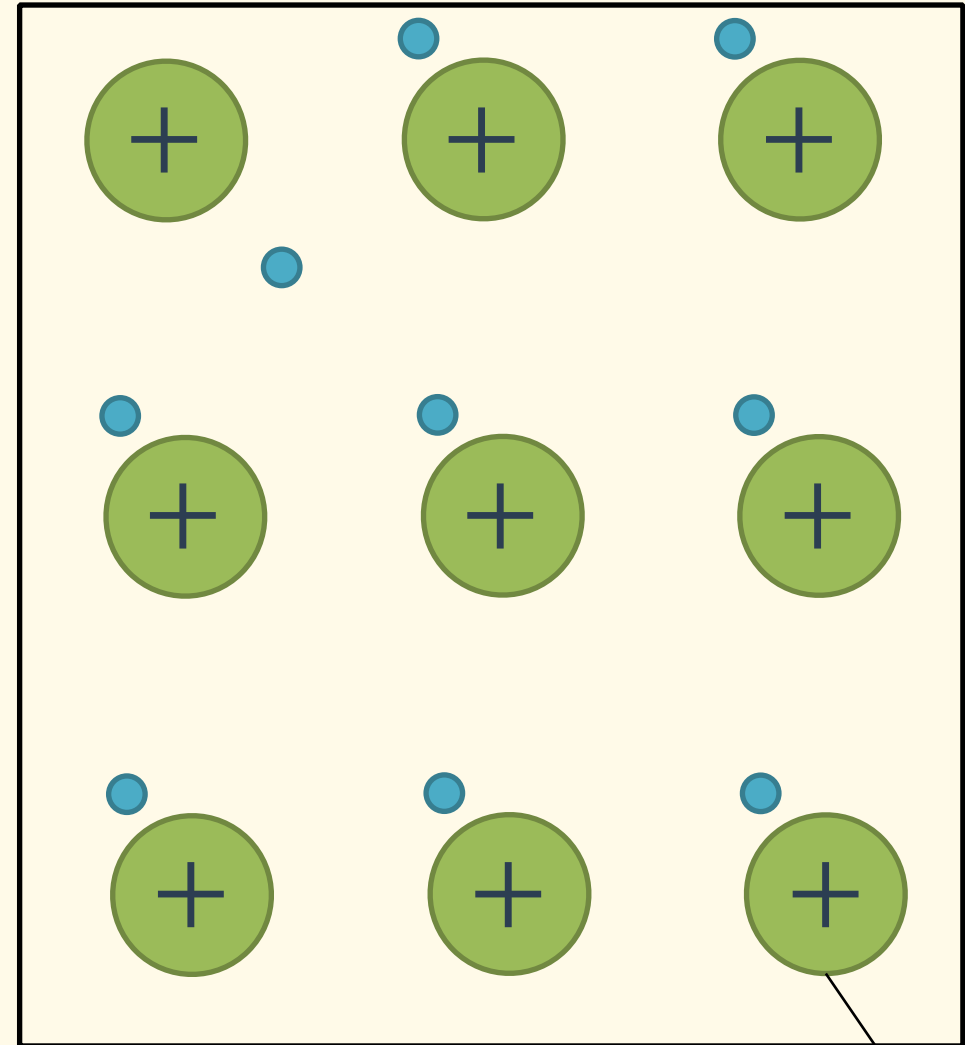
- ▶ P型半導体とn 型半導体をくっつけたもの

ホール



アクセプタイオン

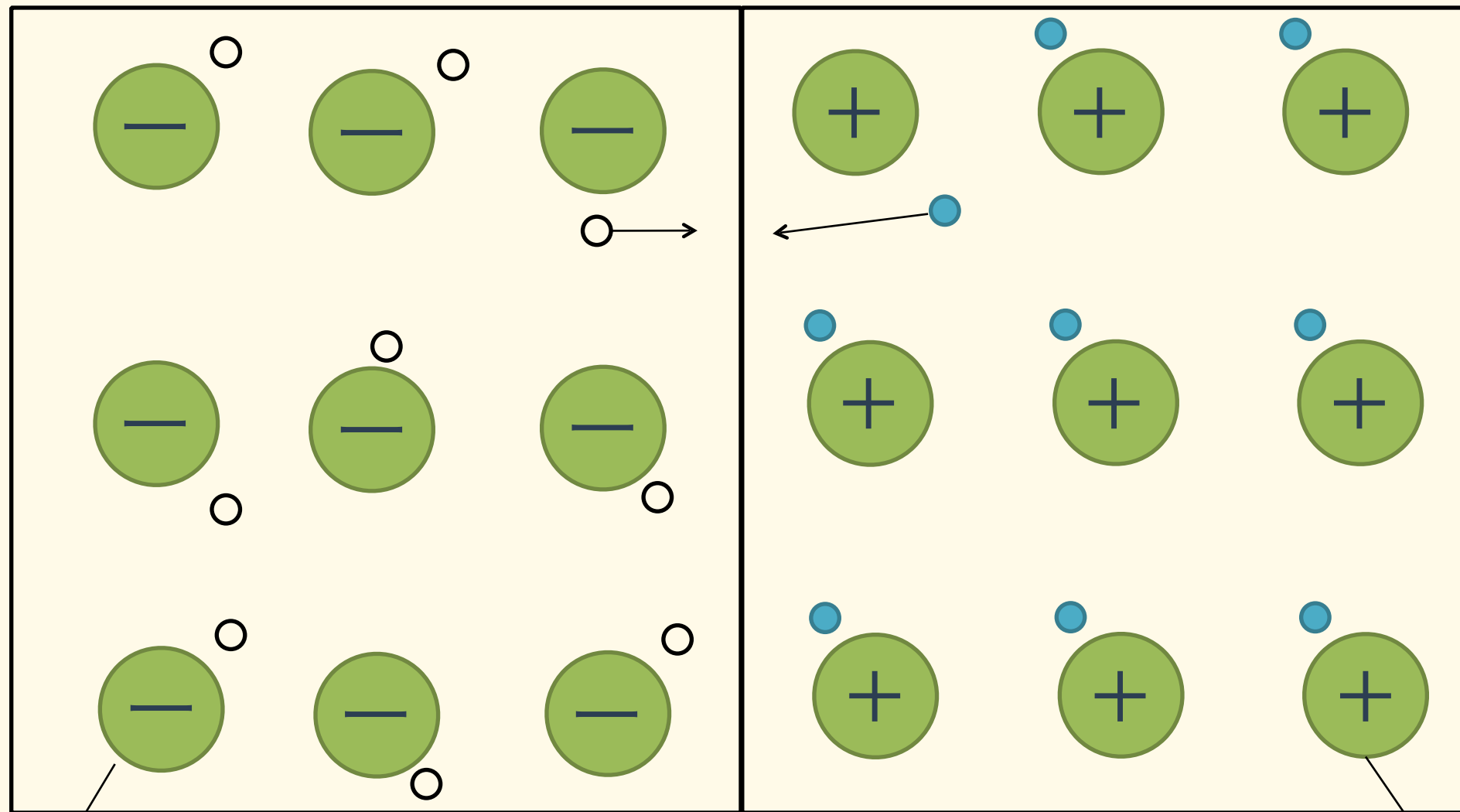
電子



ドナーイオン

ホール

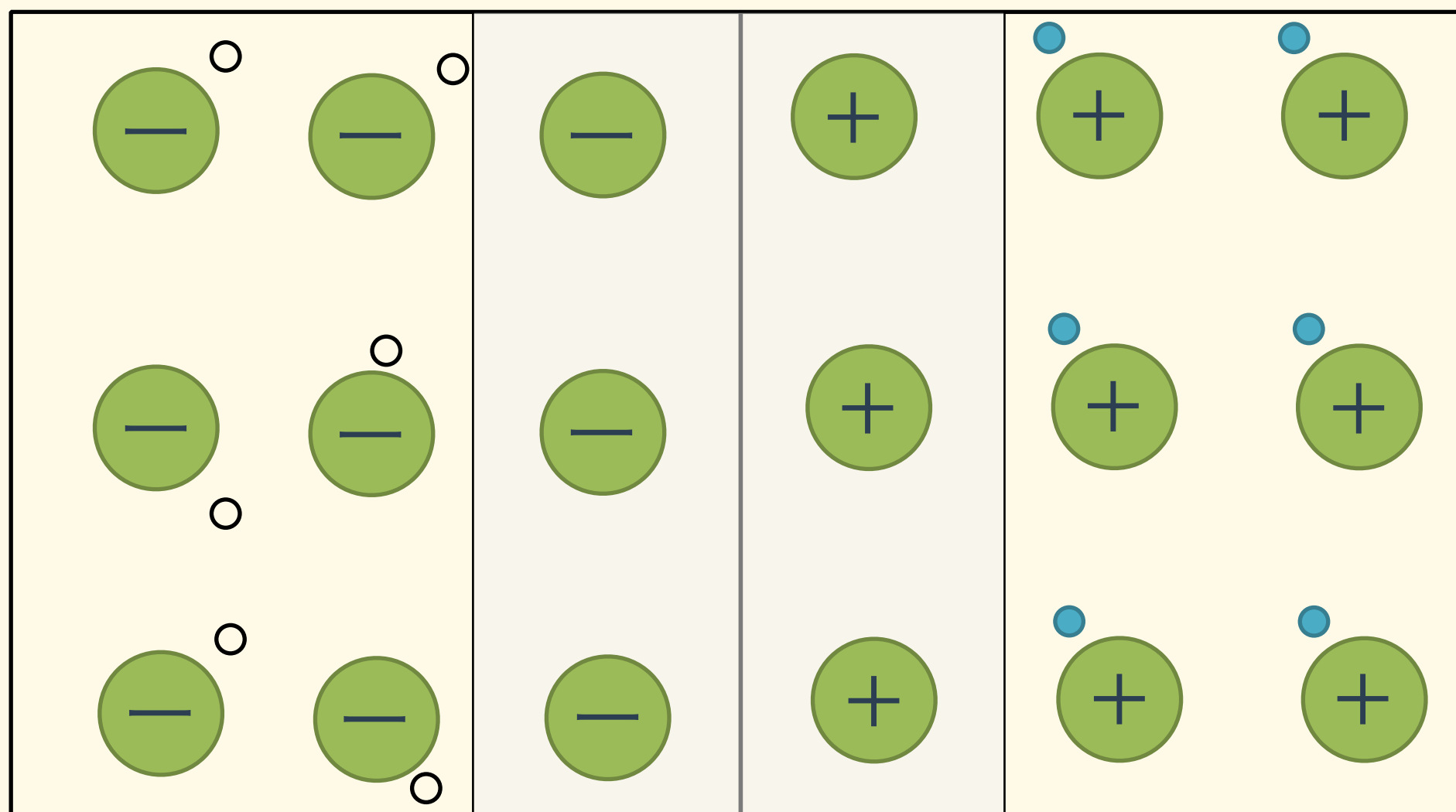
電子



アクセプタイオン

ドナーイオン

多数キャリアのホールや電子は熱で拡散されお互いにくっつく



空乏層

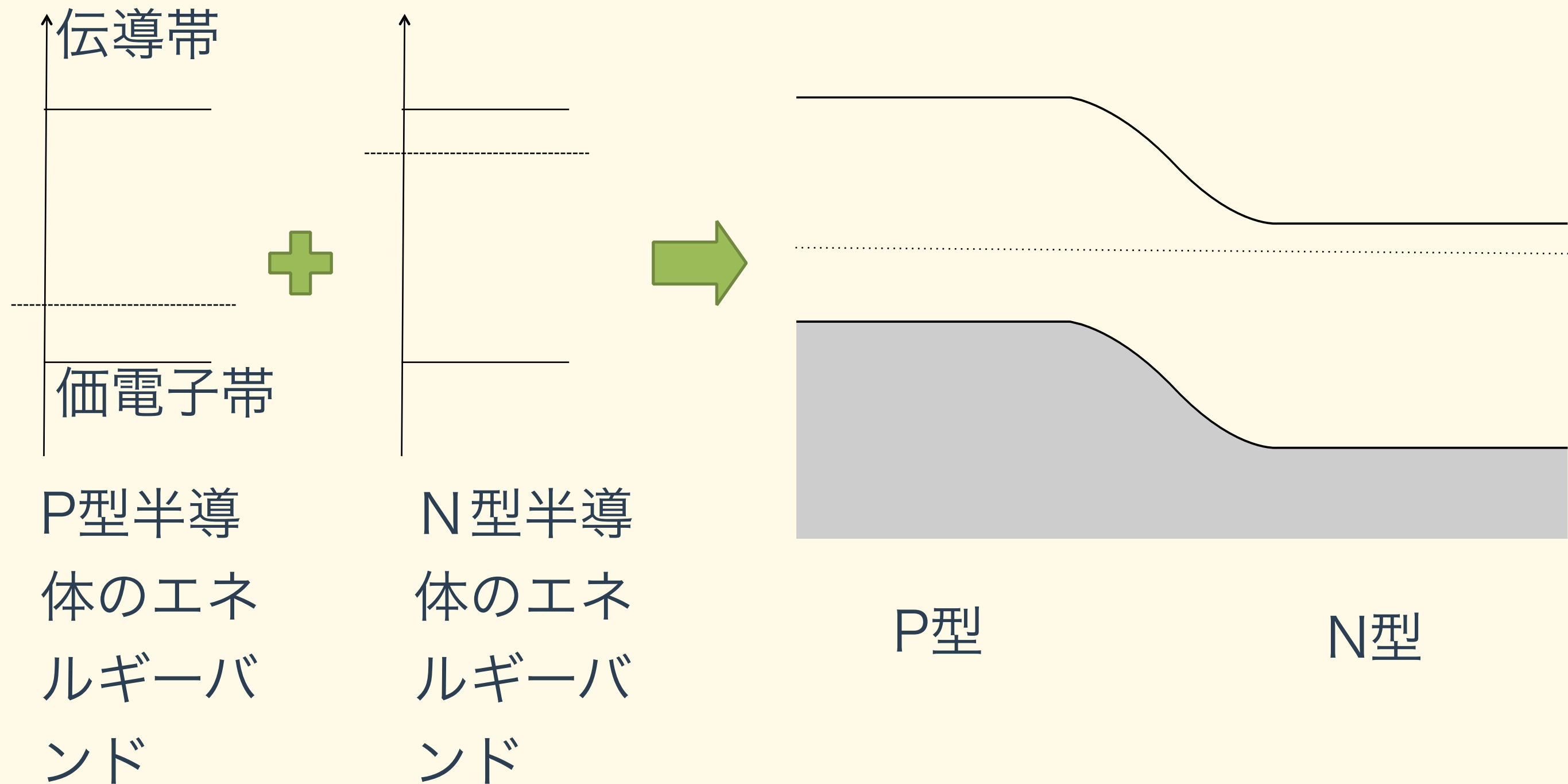
キャリアが少ない状態



電場

正孔と電子が電氣的に中和することで、電荷に偏りが生じる。
これにより、接合部では電場が生じる。

pn接合のエネルギーバンド



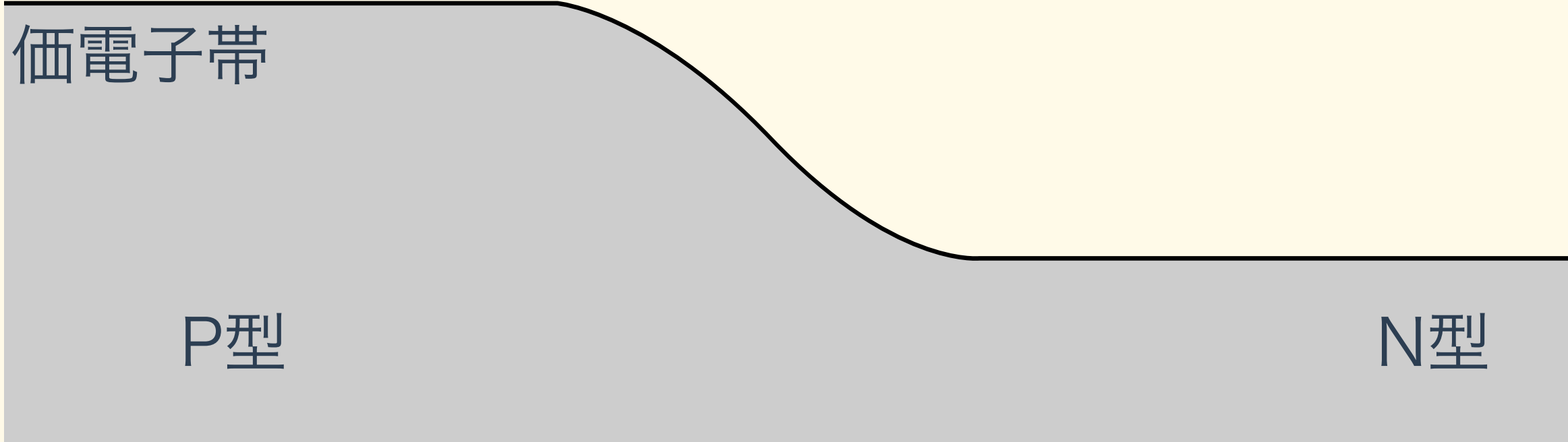
伝導帯



電位障壁



価電子帯



P型

N型

ダイオード

- ▶ 整流機能を持つ
- ▶ 電流を一定の方向にしか流さない

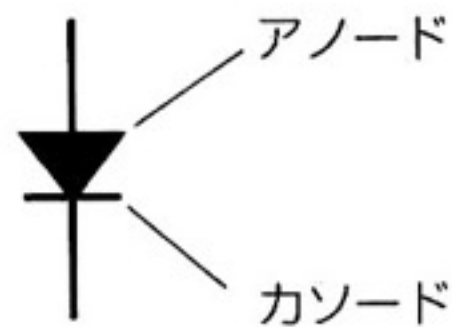
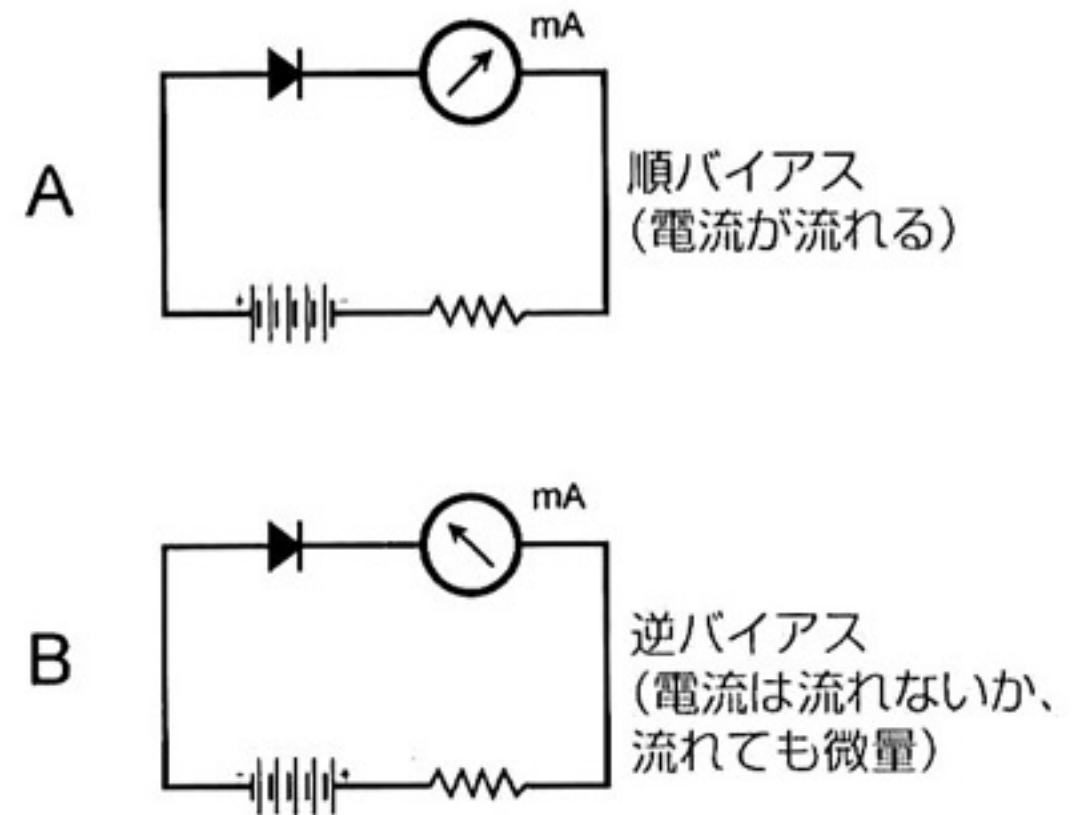


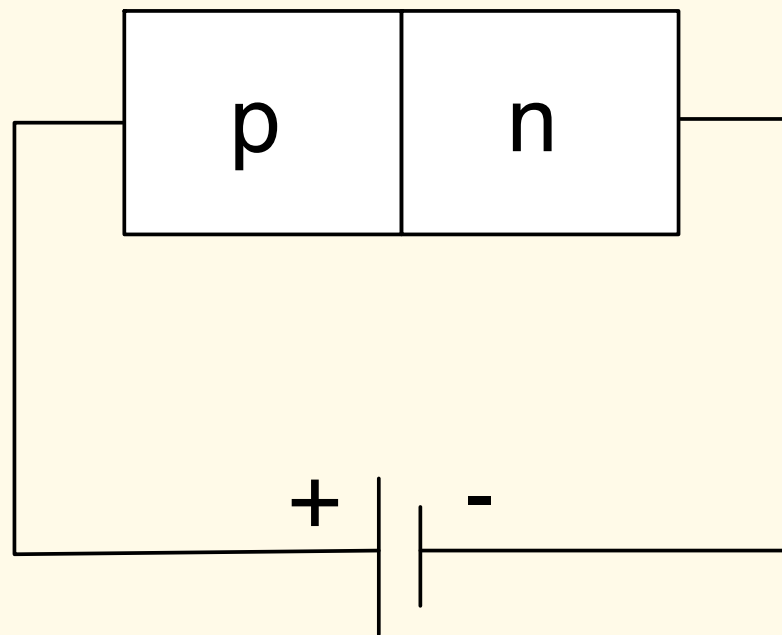
図19-3：半導体ダイオードの回路図の記号



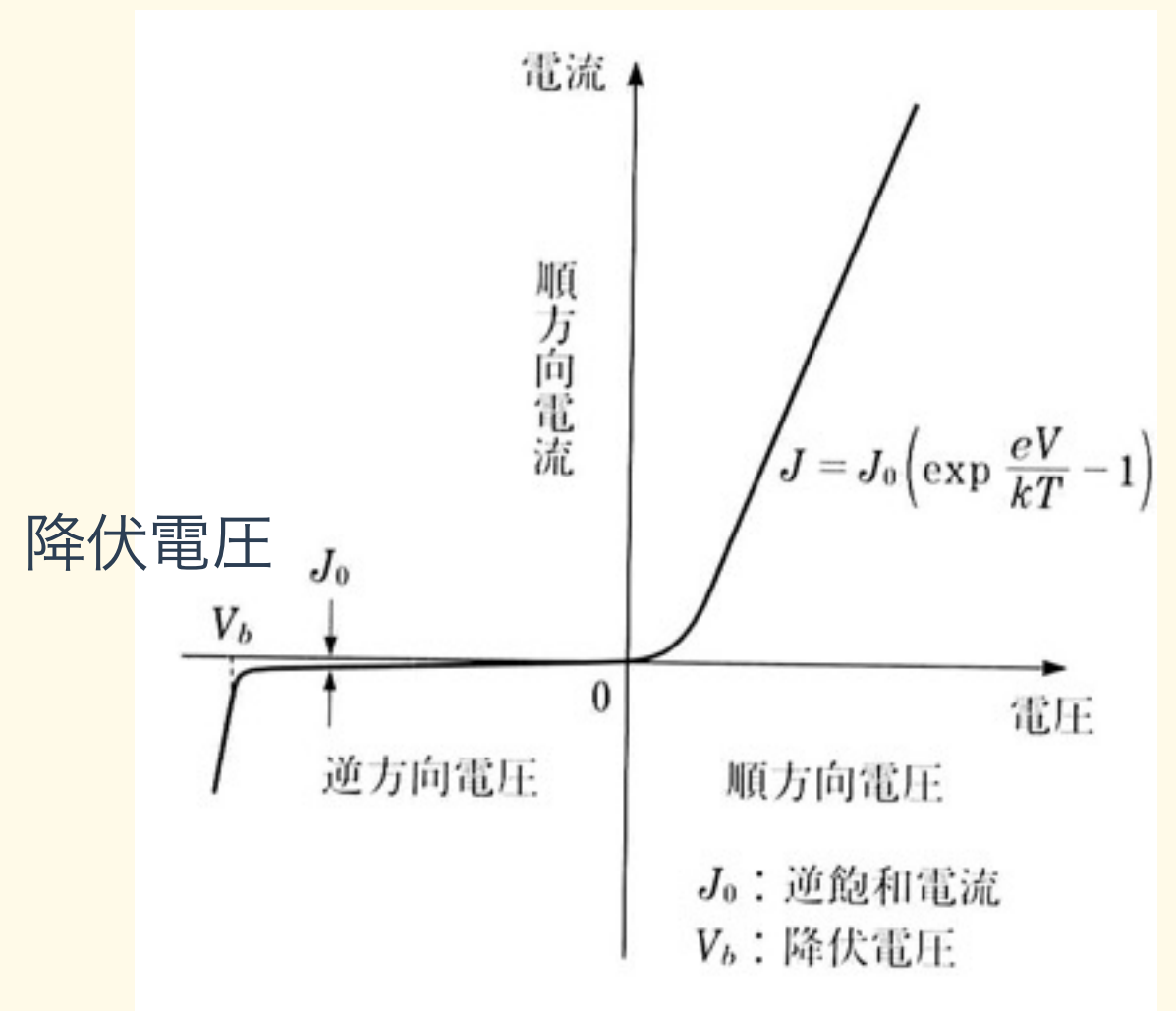
(Gibilisco, 独習電気電子工学)

pn接合ダイオード

- ▶ Pn接合で実装したダイオード

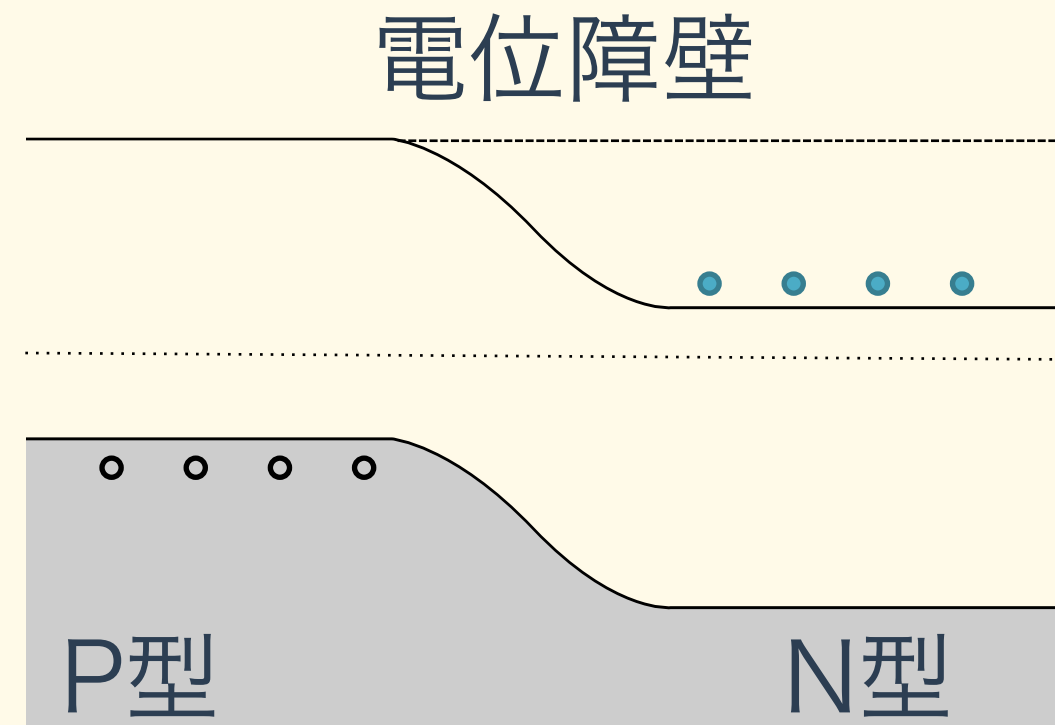
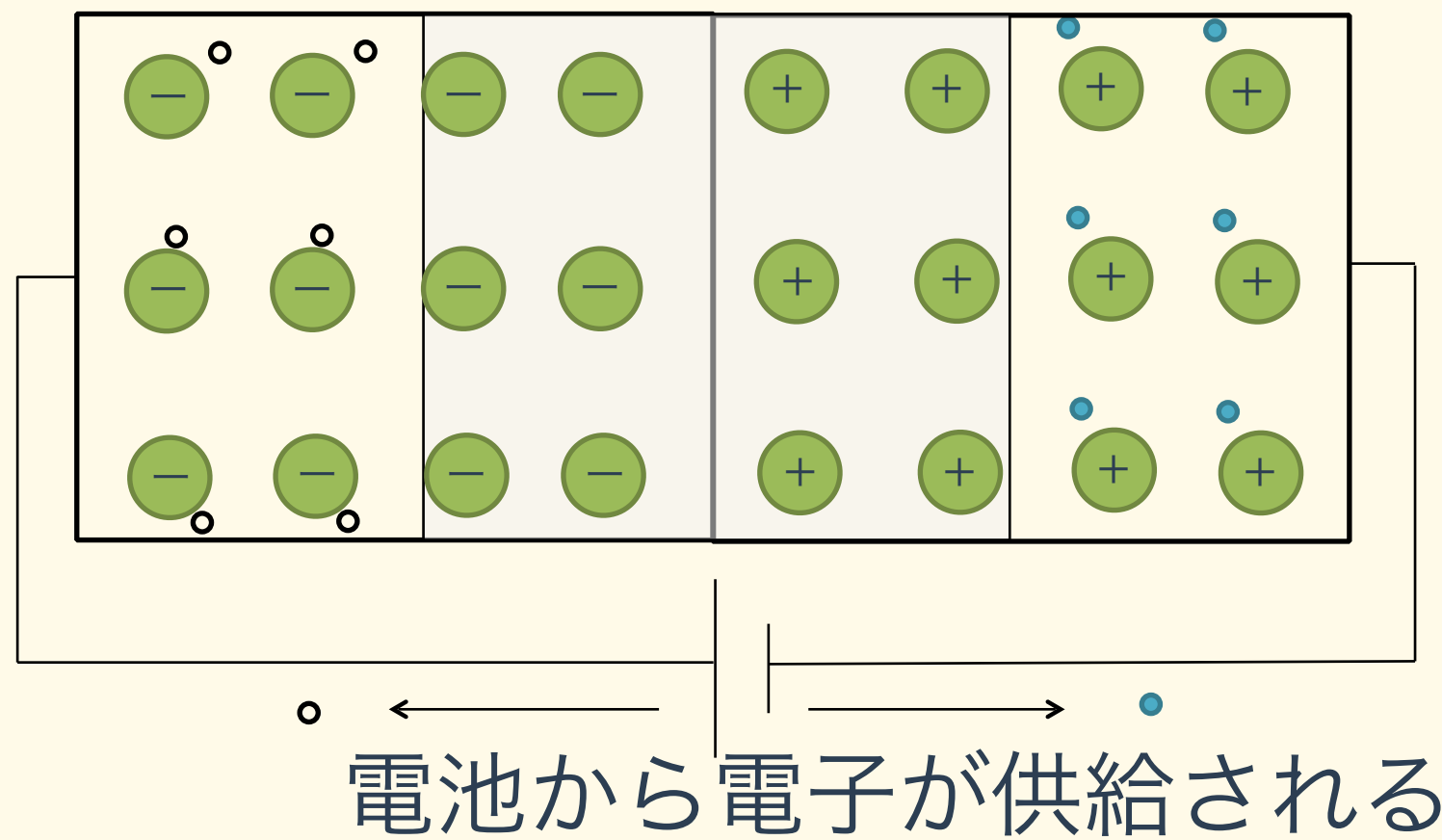


ダイオードにかかる電圧と電流の関係

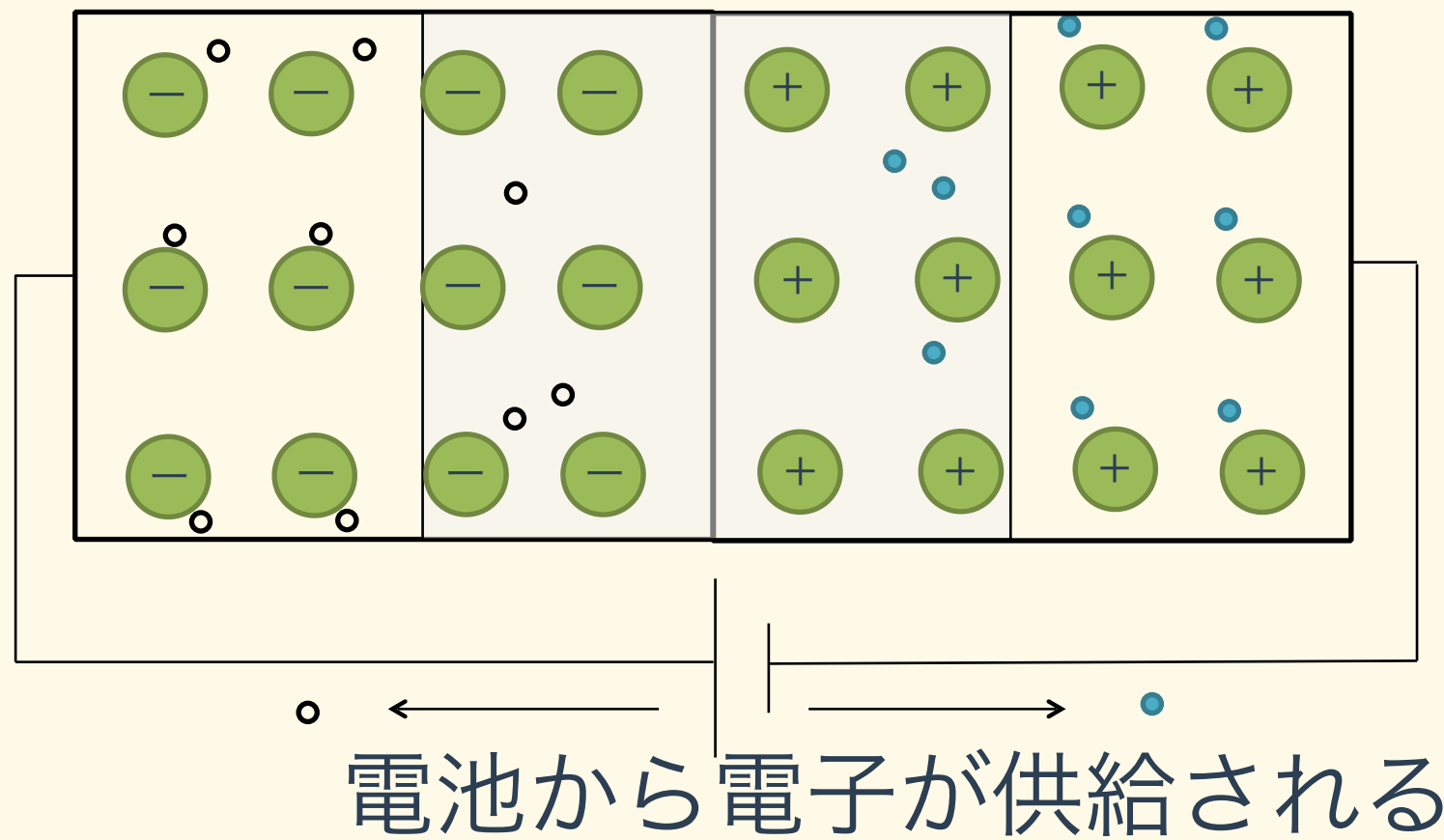


(豊田, 半導体の科学とその応用)

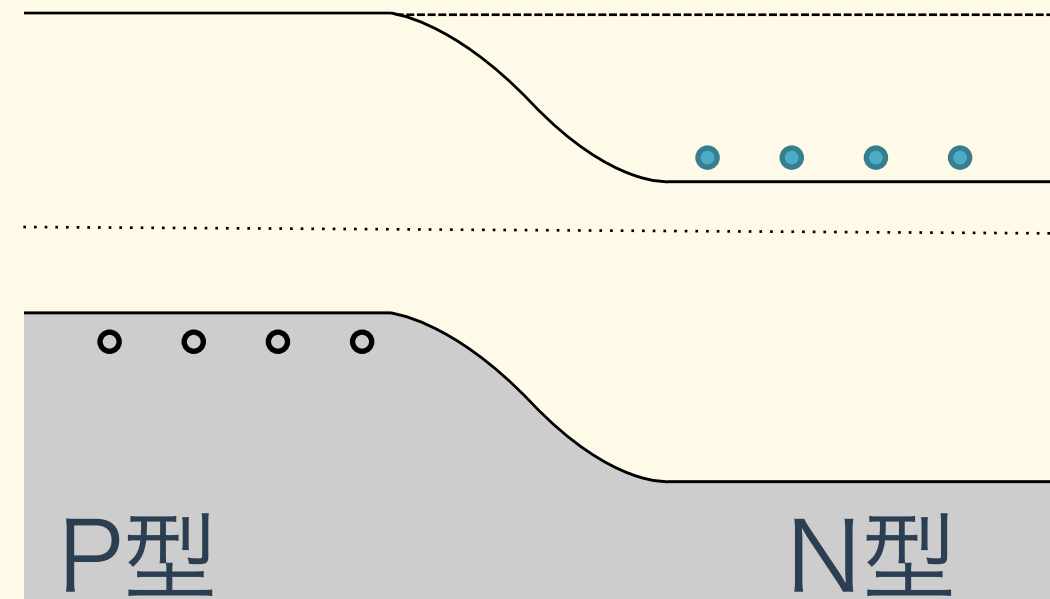
順バイアスの時



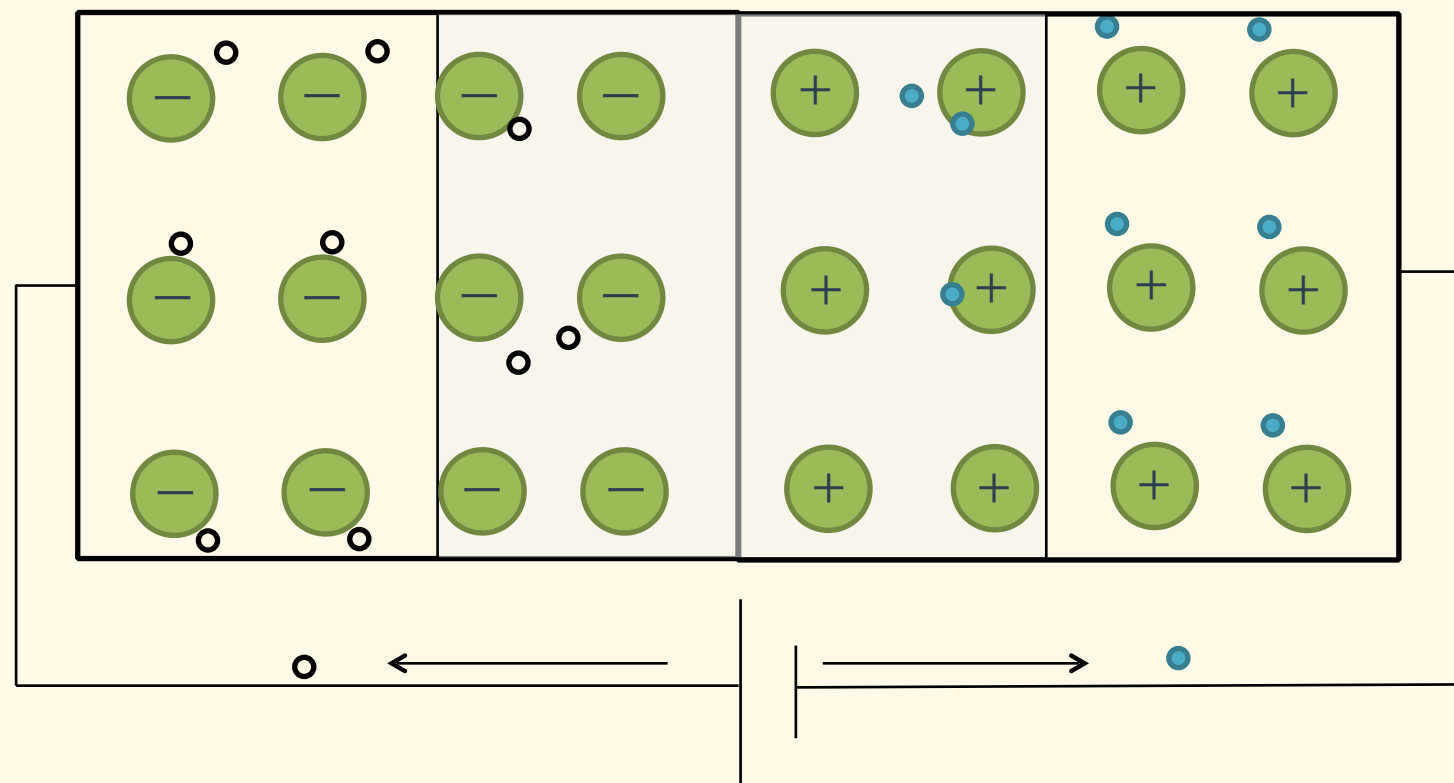
順バイアスの時



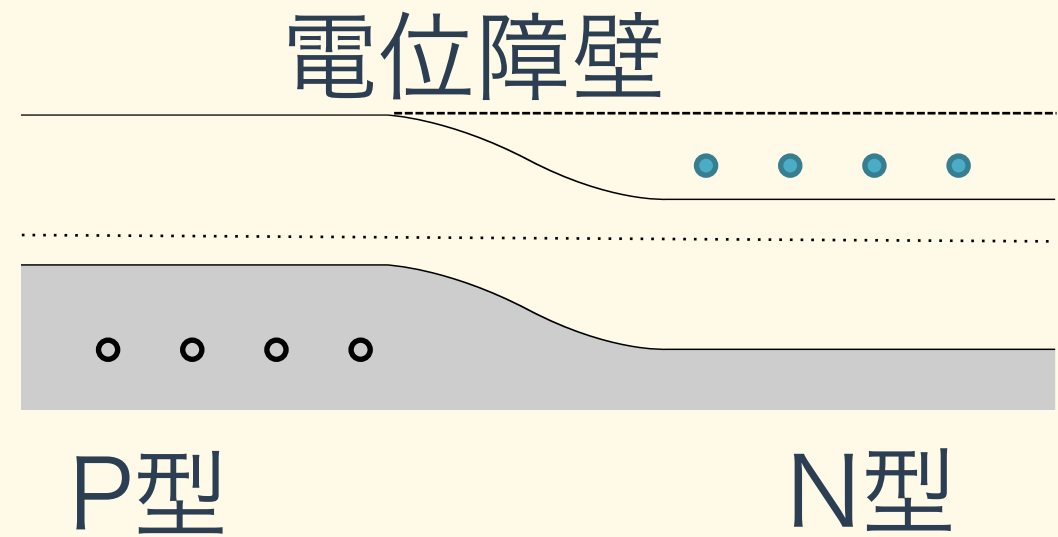
電位障壁



順バイアスの時

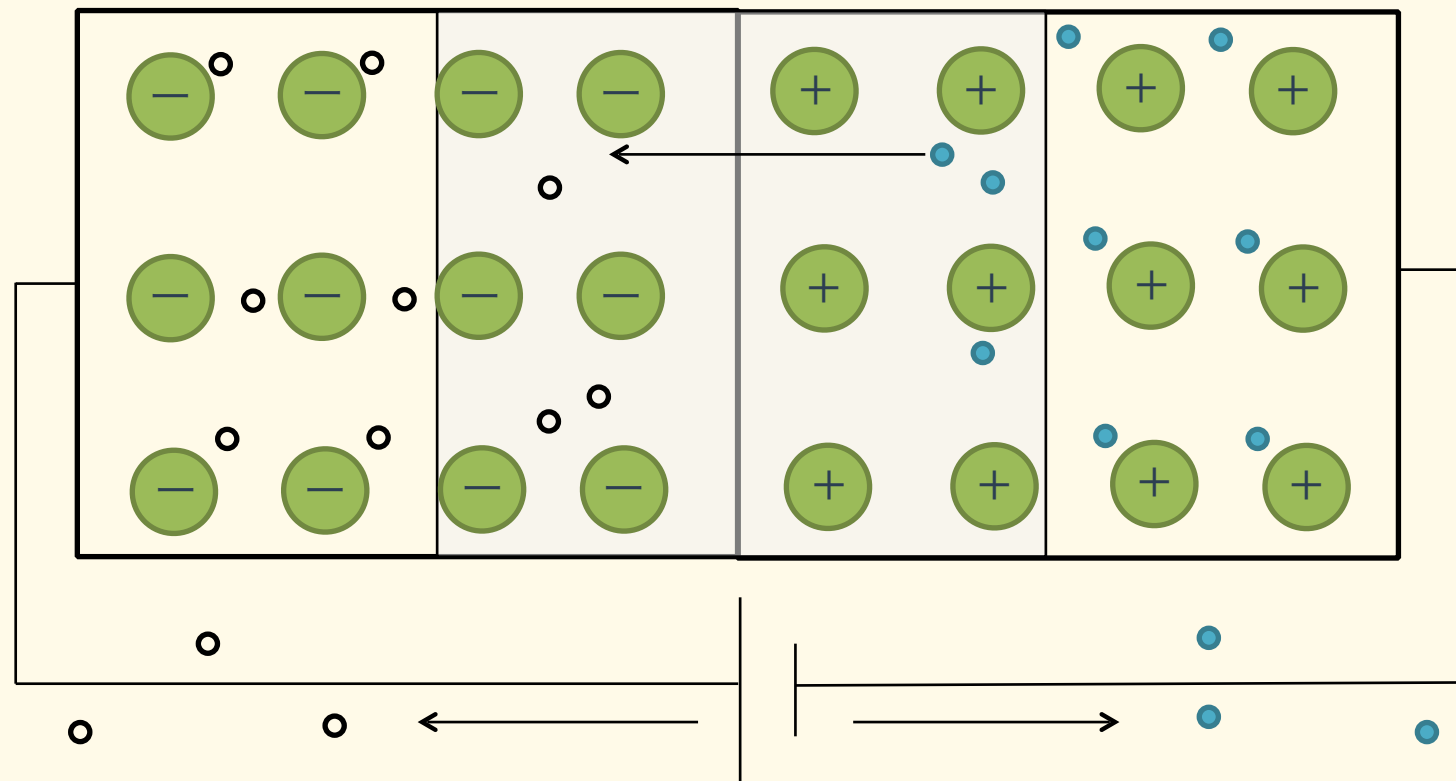


空乏層が狭まる

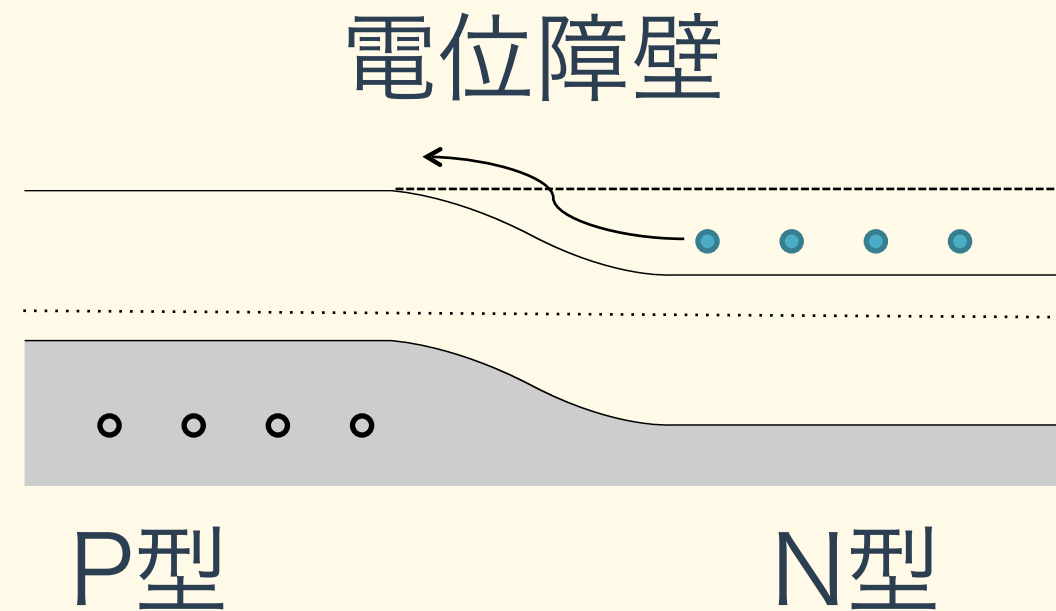


電位障壁が低くなる

順バイアスの時



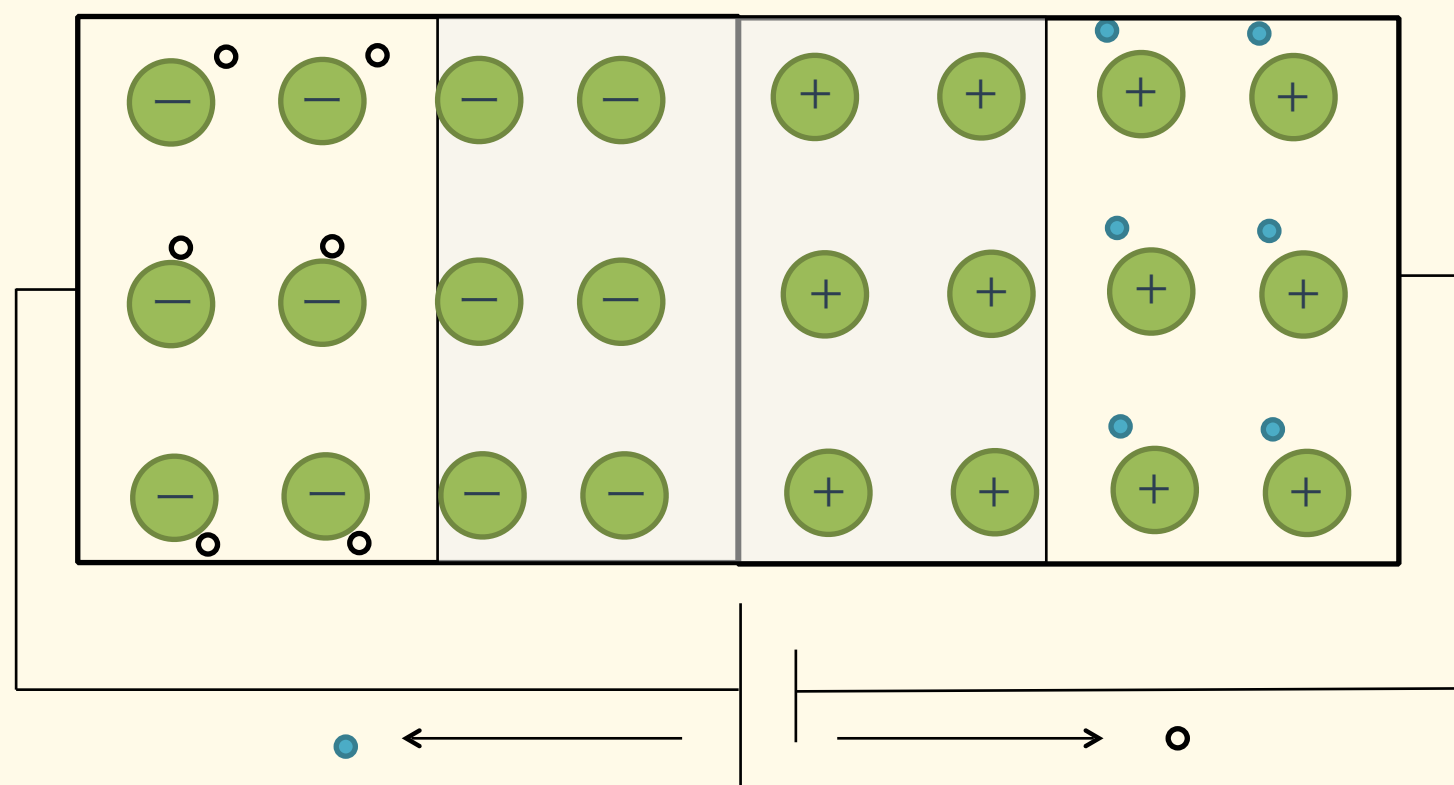
空乏層が狭まり、内部電場が弱まる。これにより電子は空乏層を越えることができる。



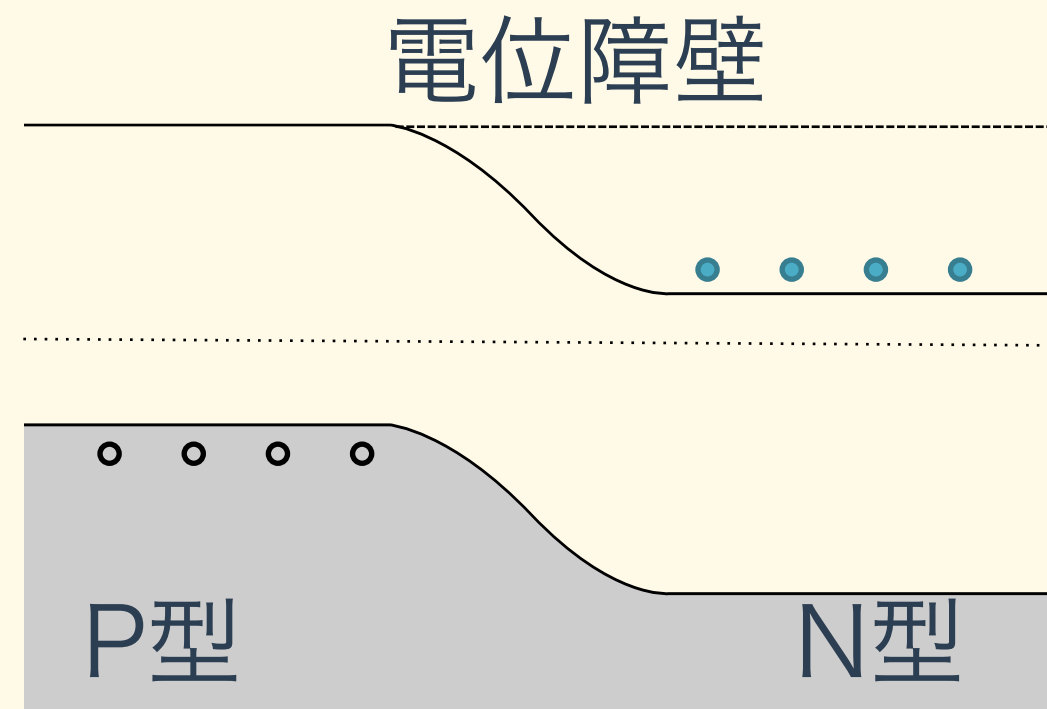
電位障壁が低くなるので、電子が障壁を飛び越えられる

ドナーイオンとアクセプタイオンにより生じていた内部電場が弱まり、電位障壁が低くなる。これにより、電流が流れる。このように電流を流しやすい方向に電圧をかけることを順バイアス（順方向バイアス）という。

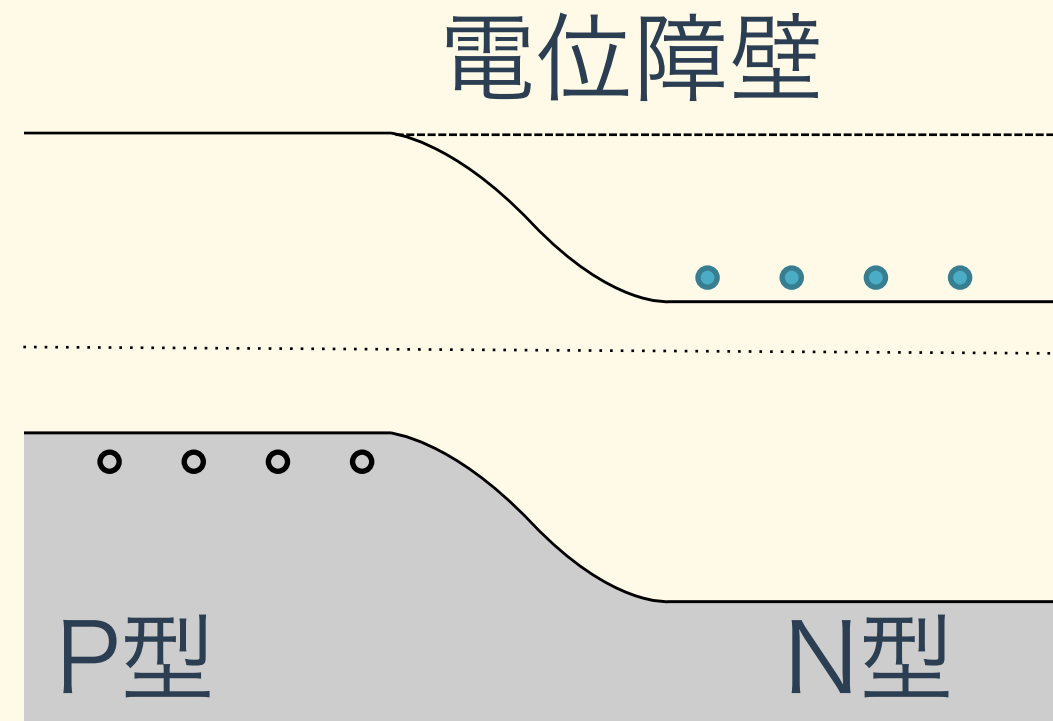
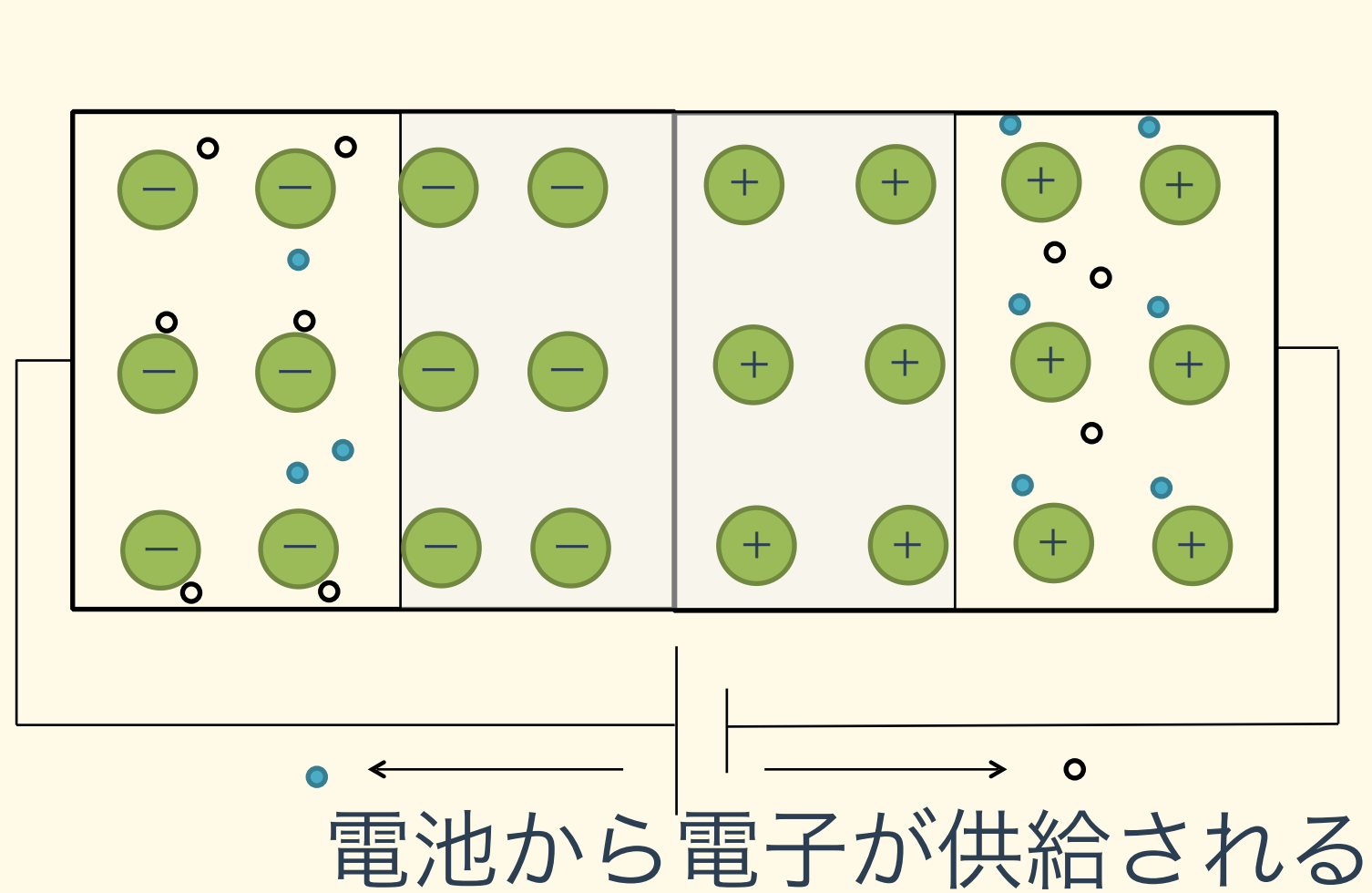
逆バイアスの時



電池から電子が供給される

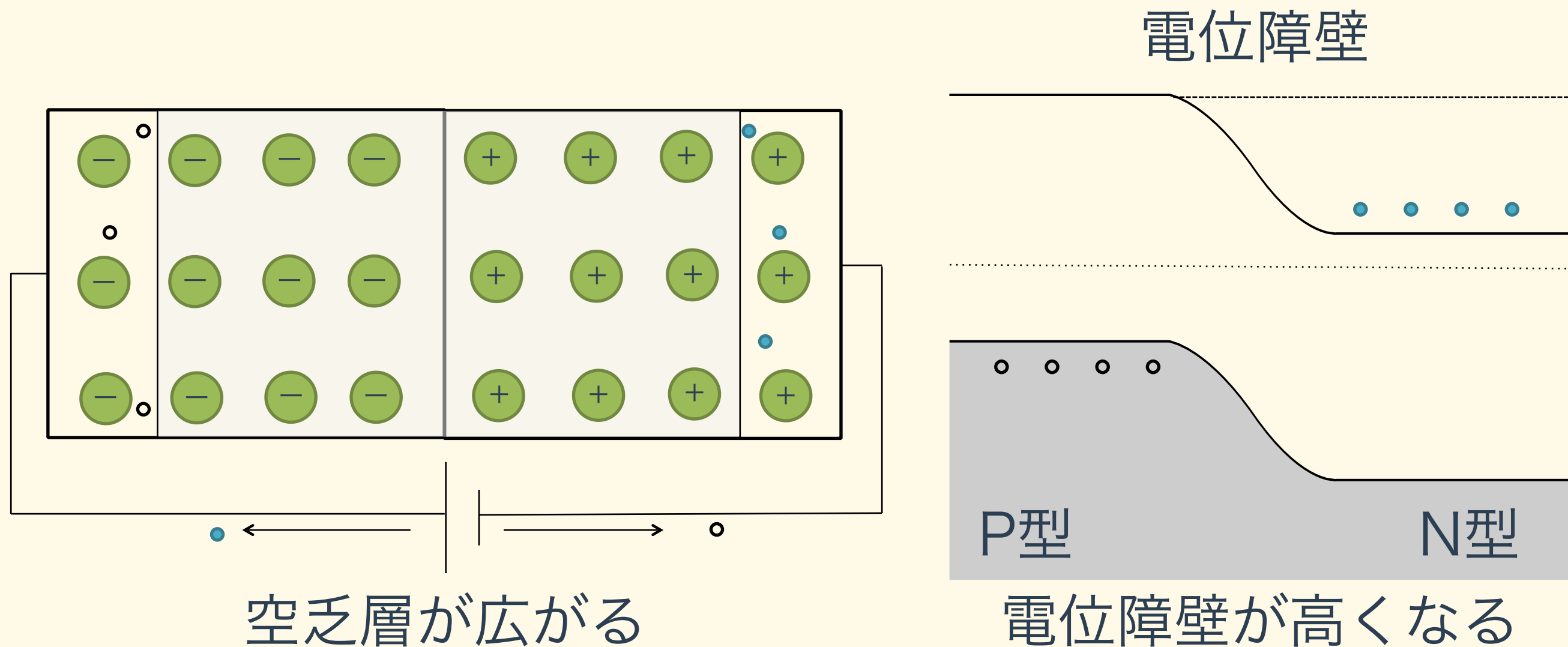


逆バイアスの時



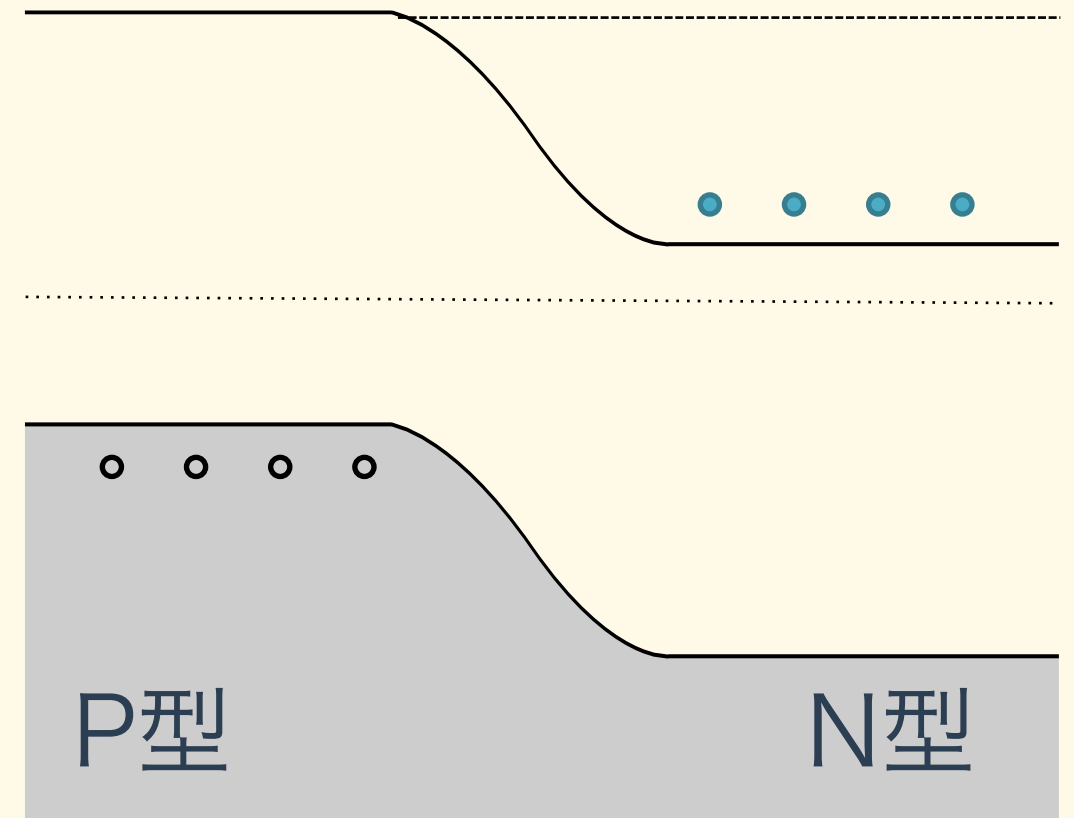
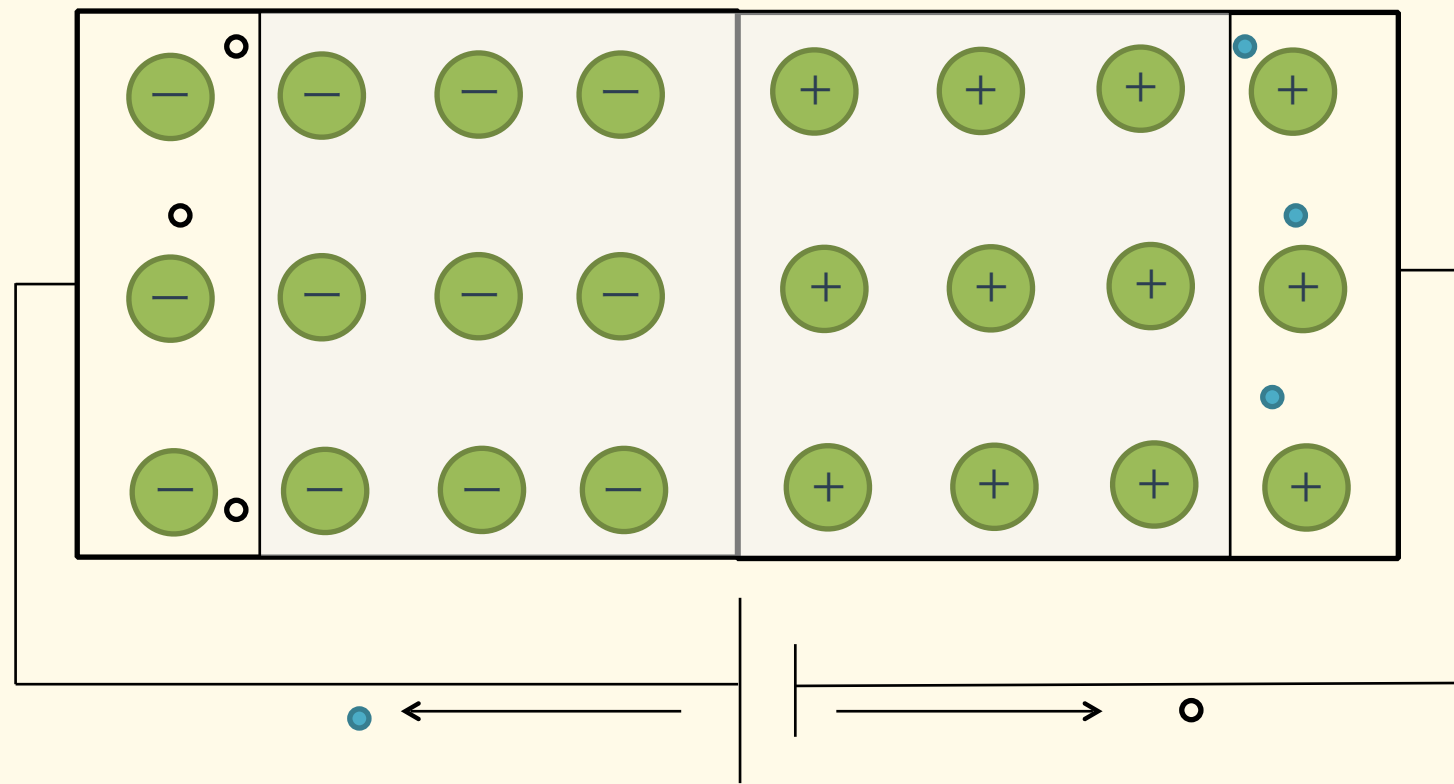
電池からp型半導体には電子が、n型半導体には正孔が増える。

逆バイアスの時



p型半導体に供給された電子はキャリアである正孔と中和され、
n型半導体に供給された正孔はキャリアである電子と中和され
る。そのことで空乏層が広がる（電位障壁が高くなる）。

逆バイアスの時



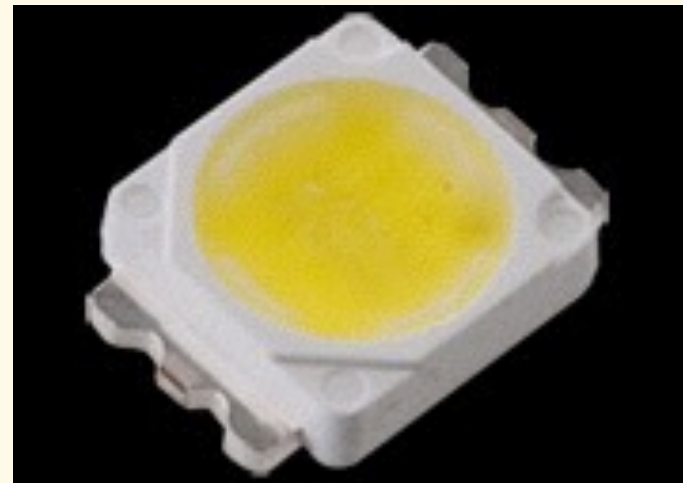
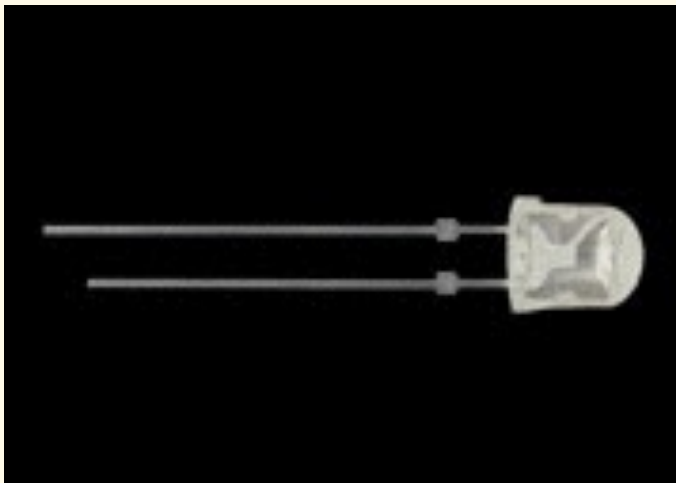
空乏層が広がり、内部電場が強くなる。それにより
用意には空乏層を通り抜けられなくなる。

電位障壁が高くなるので、電子が
障壁を飛び越えられない。

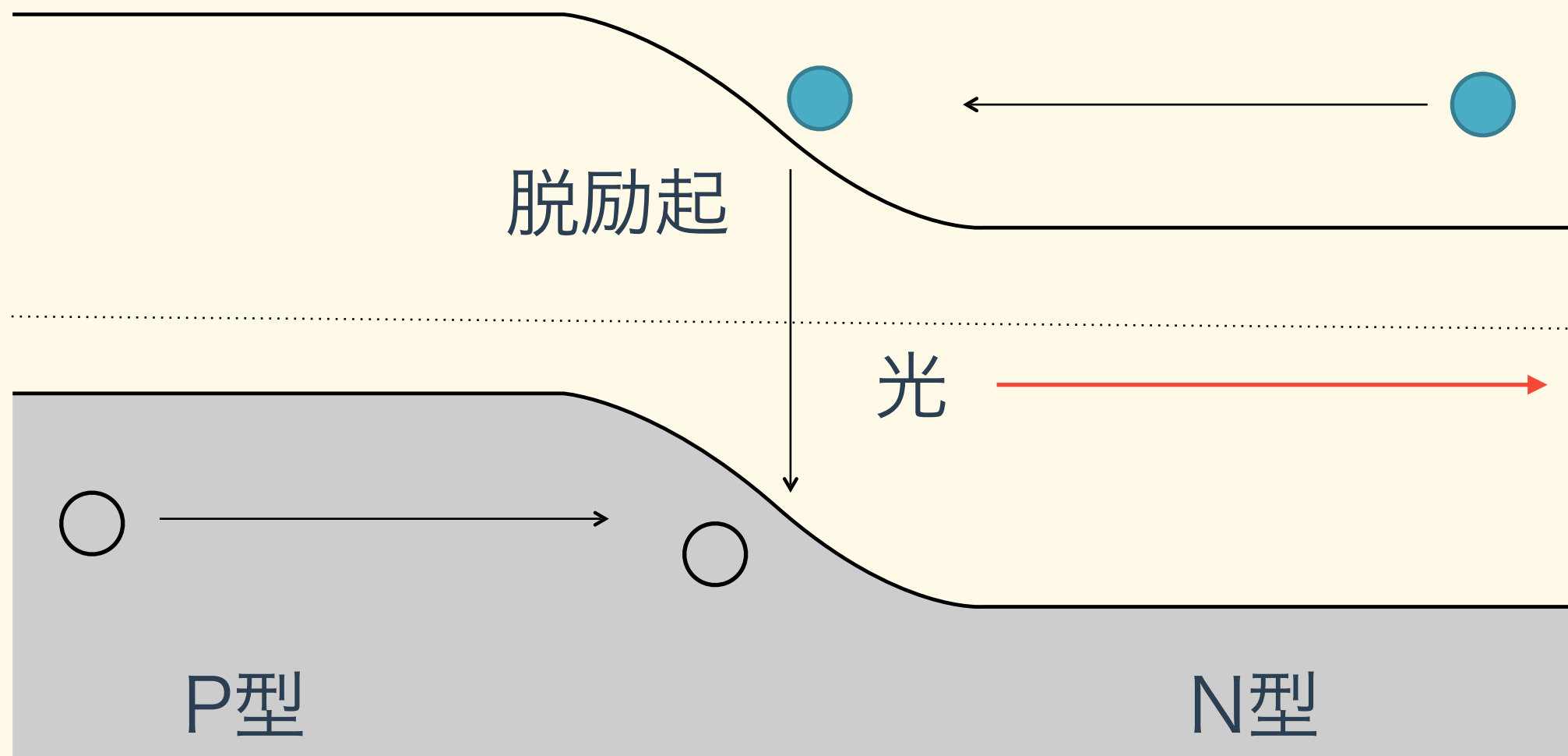
ドナーイオンとアクセプタイオンにより生じていた内部電場が強まり、電位障壁が高くなる。これにより、電流が流れにくくなる。このように電流を流しにくい方向に電圧をかけることを逆バイアス（逆方向バイアス）という。

発光ダイオード

- ▶ 発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode)



発光ダイオード



順バイアスをかけると電子と正孔が接合部でぶつかり、電子のエネルギー準位が下がる。その時、電子が失ったエネルギーが光として放出される。

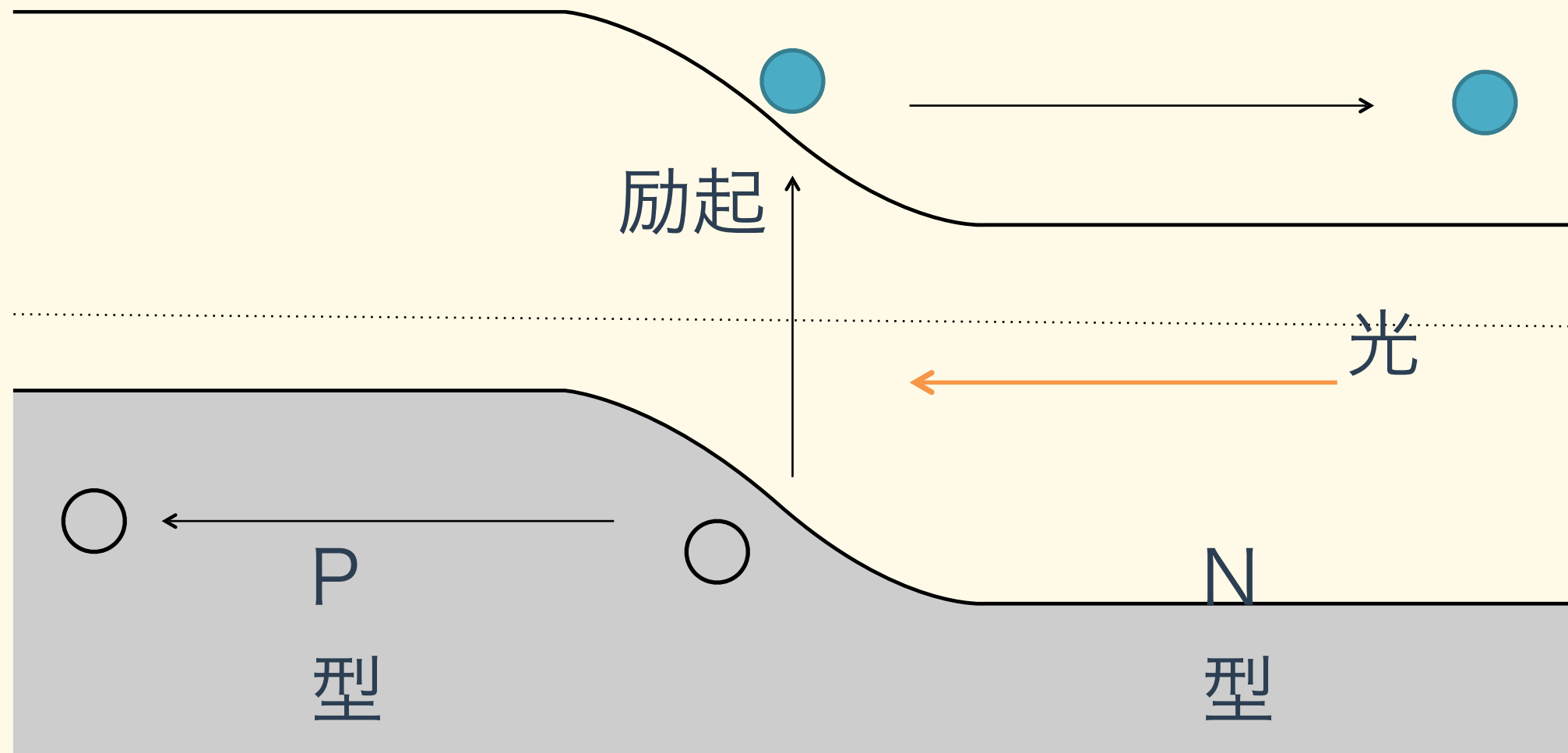
光電変換デバイス

- ▶ 太陽電池
- ▶ 光センサー



ソーラーアーク

光電変換デバイス



電子はn側に流れる
正孔はp側に流れる



電流が生じる

接合部近傍に光を受けると、電子が励起され
電子-正孔対ができる。