

2017年6月14日  
特別チュートリアル講演

# 太陽電池の基本等価回路 と電流・電圧特性

太陽光発電研究センター  
化合物薄膜チーム  
柴田 肇

# 目次

はじめに

第1章 電源の概念 —理想的な電源と現実的な電源—

第2章  $I$ - $V$ 特性の概念 —特に電源の $I$ - $V$ 特性—

第3章 現実的な電源の $I$ - $V$ 特性 —太陽電池の最も素朴なモデル—

第4章 太陽電池の $I$ - $V$ 特性 —素朴なモデルから基本的な等価回路図へ—

第5章  $pn$ 接合理論の基礎と $I$ - $V$ 特性 —素朴な $pn$ 接合理論の帰結—

まとめ

# はじめに

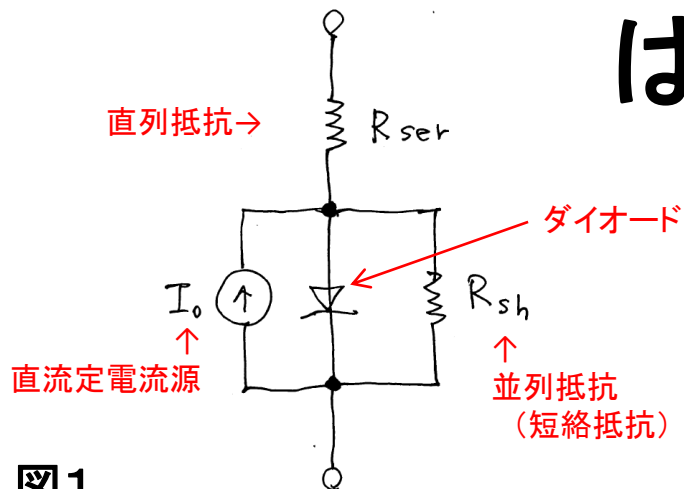


図1  
一般的な太陽電池の等価回路図

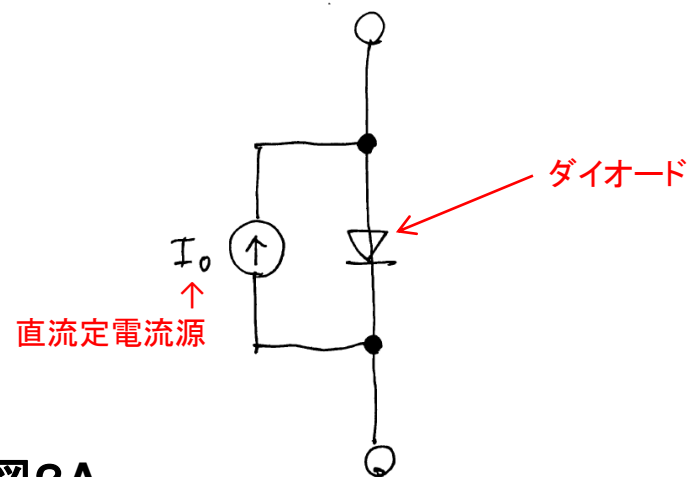


図2A  
太陽電池の本質的な等価回路図

$R_{ser}$  や  $R_{sh}$  などは太陽電池の本質的な要素ではなく、(構成材料の電気伝導度が $\infty$ ではないことも含めて) 諸般の事情によって発生する付加的な要素である。

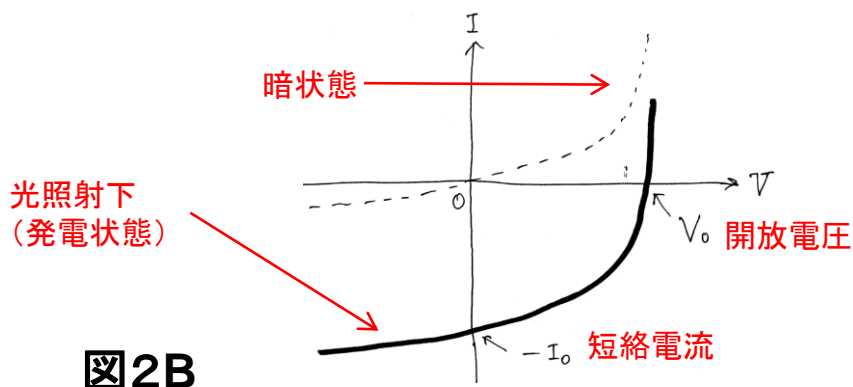


図2B  
図2Aの等価回路のI-V特性(模式図)

図2Bの曲線を表す理論式

$$I = I_S \left\{ \exp \left( \frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right\} - I_0$$

逆方向飽和電流

$$V_0 = \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left\{ \left( \frac{I_0}{I_S} \right) + 1 \right\}$$

# 第1章 電源の概念

## 理想的な電源と現実的な電源

太陽電池を理解するために重要なポイントは、電源の概念を理解することである。

	定電圧電源	定電流電源
直流電源	直流定電圧電源	直流定電流電源
交流電源	交流定電圧電源	交流定電流電源

- ・直流定電圧電源の例: 乾電池 (1.5 V)
- ・交流定電圧電源の例: 電灯線コンセント (100 V)

理想的な { 定電圧電源: 無限に電流を取り出すことができる  
定電流電源: 無限に電圧を取り出すことができる

但し、性能の限界はある { 定電圧電源: 短絡電流  
定電流電源: 開放電圧

理想的な電源の内部抵抗

電源の種類	直流定電圧電源	直流定電流電源
内部抵抗	ゼロ	$\infty$

## 理想的な直流定電圧電源の内部抵抗がゼロでなければならない理由

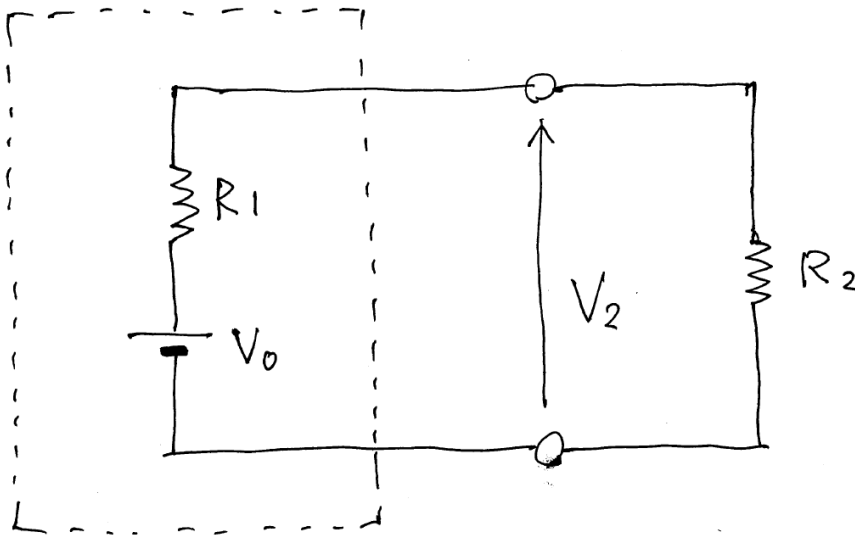


図3  
理想的な直流定電圧電源の内部抵抗がゼロである説明

電池の記号(— | ■ —)は、内部抵抗の無い**仮想的な**直流定電圧電源(起電力は $V_0$ であるとする)である。

もし破線で囲まれた電源系が本当に理想的な定電圧電源であるならば、 $V_2$ の値は $R_2$ の値に無関係に一定値でなければならない。

しかしながら、図3では  $V_2 = \{R_2 / (R_1 + R_2)\} V_0$  となり、 $V_2$ の値は $R_2$ の値に依存する。

言い換えるならば、 $V_2$ の値が $R_2$ の値に無関係に一定値になるためには、 $R_1 = 0$  である必要がある。

★ 電気回路のある部分に理想的な直流定電圧電源が接続され、その発生電圧  $V$  が  $V = 0$  に設定された場合は、その部分は**電氣的に短絡**されたことになる。

## 理想的な直流定電流電源の内部抵抗が $\infty$ でなければならない理由

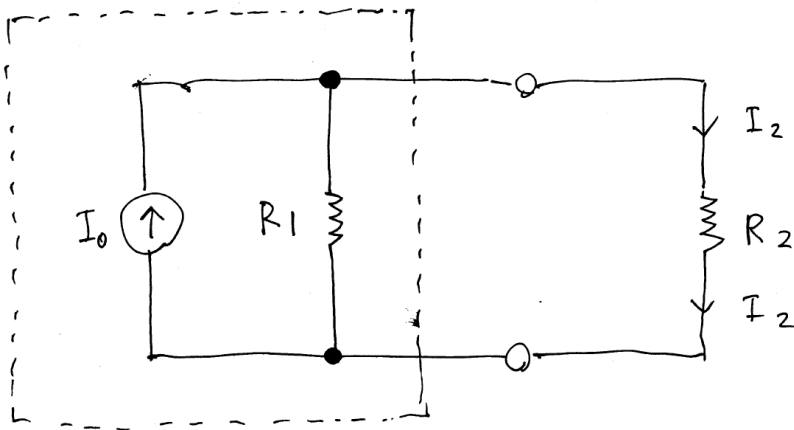


図4  
理想的な直流定電流電源の内部抵抗が $\infty$ である説明

図4の(↑)の記号は、内部抵抗が $\infty$ である**仮想的な直流定電流電源**(発生電流値は $I_0$ であるとする)である。

もし破線で囲まれた電源系が本当に理想的な定電流電源であるならば、 $I_2$ の値は $R_2$ の値に無関係に一定値でなければならない。

しかしながら、図4では  $I_2 = \{R_1 / (R_1 + R_2)\} I_0$  となり、 $I_2$ の値は $R_2$ の値に依存する。

言い換えるならば、 $I_2$ の値が $R_2$ の値に無関係に一定値になるためには、 $R_1 = \infty$  である必要がある。

★ 電気回路のある部分に理想的な直流定電流電源が接続され、その発生電流  $I$  が  $I = 0$  に設定された場合は、その部分は**電氣的に開放(=切断)**されたことになる。

## 理想的な直流定電圧電源を使って理想的な直流定電流電源を作る方法

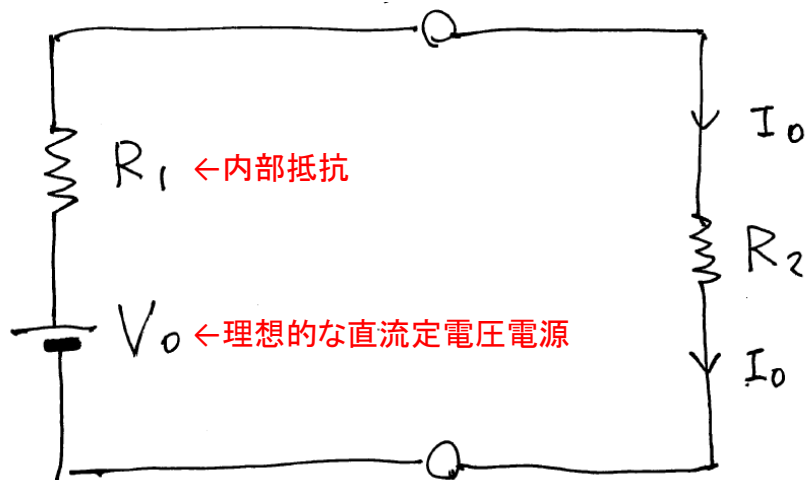


図5  
理想的な直流定電圧電源を使って理想的な直流定電流電源を作る方法

電源系に負荷抵抗  $R_2$  を接続したときに、 $R_2$  を流れる電流の値は、 $I_0 = V_0 / (R_1 + R_2)$  である。

この値が  $R_2$  の値に無関係に一定値になるためには、 $V_0$  と  $R_1$  の値を  $V_0 / R_1 = \text{const.}$  に維持しながら、 $V_0 \rightarrow \infty$ 、 $R_1 \rightarrow \infty$  とすればよい。

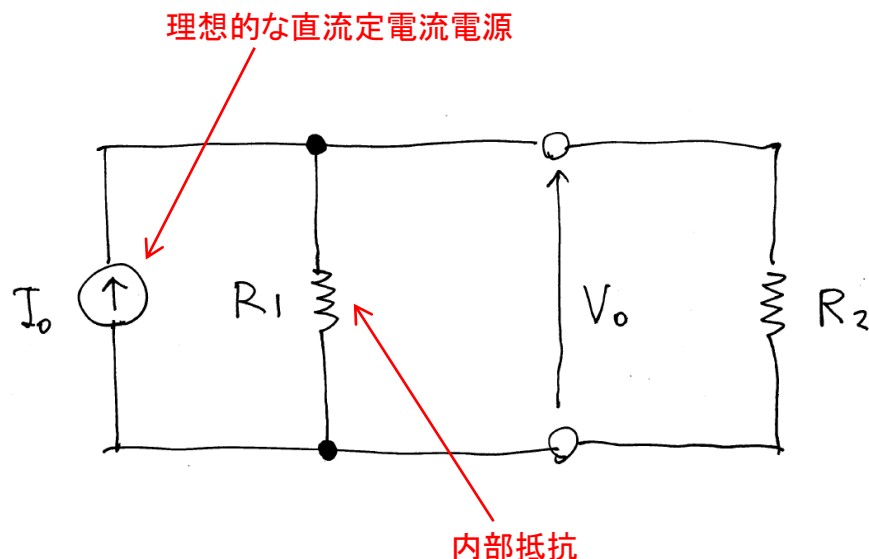
そうすると、 $I_0$  の値は、 $R_2$  の値に無関係に一定値 ( $= V_0 / R_1$ ) になる。

これは、発生電流が  $I_0 = V_0 / R_1$  であるような、理想的な直流定電流電源である。

**理想的な直流定電流電源は、内部抵抗が  $\infty$  である必要があることも、同時に確認された。**



## 理想的な直流定電流電源を使って理想的な直流定電圧電源を作る方法



**図6**  
理想的な直流定電流電源を使って理想的な直流定電圧電源を作る方法

電源系に負荷抵抗  $R_2$  を接続したときに、 $R_2$  の両端に発生する電圧の値は、 $V_0 = \{R_2 / (R_1 + R_2)\} I_0 R_1$  である。

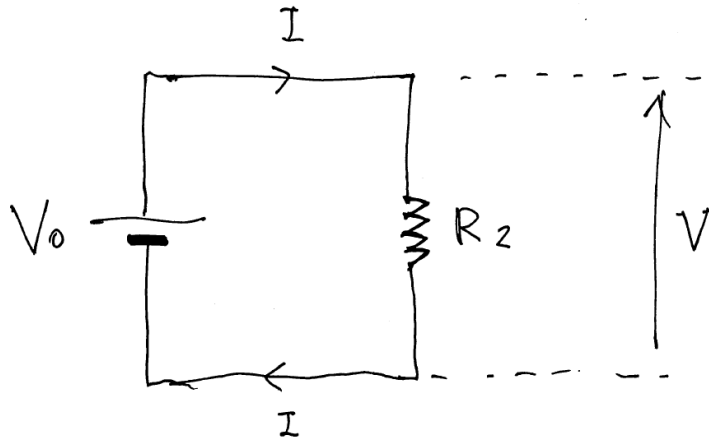
この値が  $R_2$  の値に無関係に一定値になるためには、 $I_0$  と  $R_1$  の値を  $I_0 R_1 = \text{const.}$  に維持しながら、 $I_0 \rightarrow \infty$ 、 $R_1 \rightarrow 0$  とすればよい。

そうすると、 $V_0$  の値は、 $R_2$  の値に無関係に一定値 ( $= I_0 R_1$ ) になる。

これは、発生電圧が  $V_0 = I_0 R_1$  であるような、理想的な直流定電圧電源である。

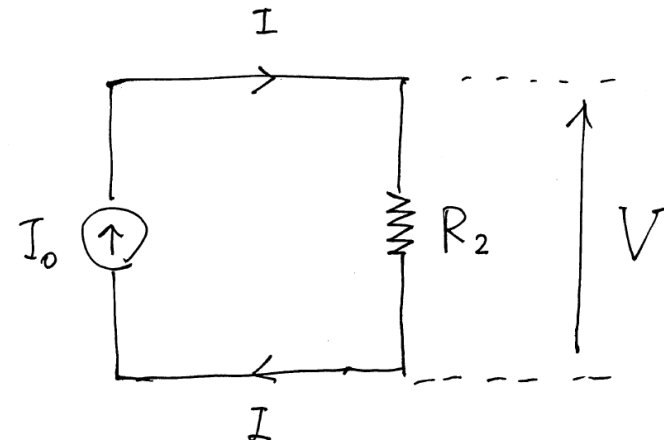
**理想的な直流定電圧電源は、内部抵抗がゼロである必要があることも、同時に確認された。**

## 理想的な定電圧電源の短絡電流と理想的な定電流電源の開放電圧



**図7A**  
理想的な定電圧電源の短絡電流

負荷抵抗 $R_2$ の両端に発生する電圧 $V$ は $V = IR_2$ で与えられるが、 $R_2 = 0$  (短絡状態)であるにもかかわらず $V$ が有限値( $= V_0$ )であるためには、 $I = \infty$ である必要がある。  
従って、理想的な直流定電圧電源の短絡電流は $\infty$ である。



**図7B**  
理想的な定電流電源の開放電圧

回路を流れる電流 $I$ は $I = V/R_2$ で与えられるが、 $R_2 = \infty$  (開放状態)であるにもかかわらず $I$ が有限値( $= I_0$ )であるためには、 $V = \infty$ である必要がある。  
従って、理想的な直流定電流電源の開放電圧は $\infty$ である。

表1 理想的な直流定電流電源が満足すべき性質

電源の種類	発生電圧 発生電流	内部抵抗	開放電圧	短絡電流
理想的な直流定電圧電源	$V_0$	ゼロ	$V_0$	$\infty$
理想的な直流定電流電源	$I_0$	$\infty$	$\infty$	$I_0$

現実的な電源装置は、内部抵抗が有限の値を持つし、また開放電圧や短絡電流の値も共に有限の値を持つ。

また、それ以外にも様々な非理想的な(現実的な)性質を持つ。

ここでは、理想的な電源装置に対して、**内部抵抗が有限**であるという修正のみを施した電源装置を考えて、“**第一種の電源**”と命名し、表2のように定義する。

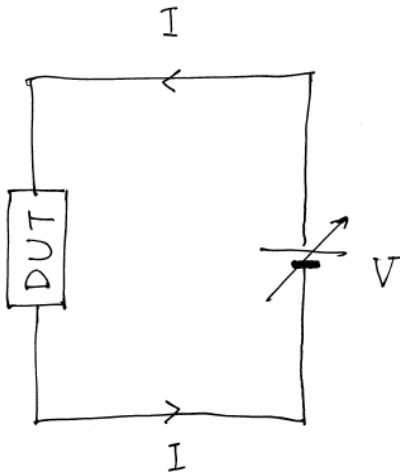
表2 第一種の電源の定義

電源の種類	発生電圧 発生電流	内部抵抗	開放電圧	短絡電流
第一種の直流定電圧電源	$V_0$	$R_1$	$V_0$	$V_0/R_1$
第一種の直流定電流電源	$I_0$	$R_2$	$I_0 R_2$	$I_0$

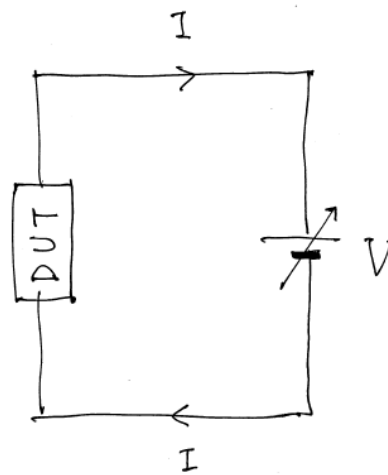
# 第2章 $I$ - $V$ 特性の概念

## 特に電源の $I$ - $V$ 特性

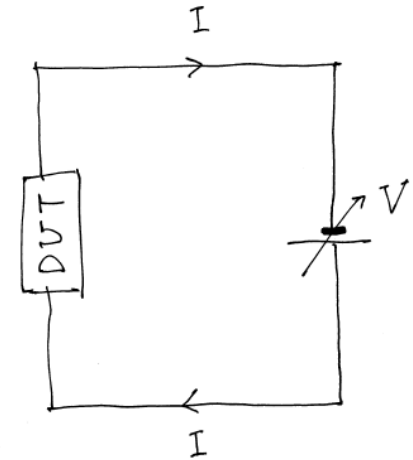
# DUT (Device Under Test) を測定装置と接続した場合の、 $V$ と $I$ の正の方向の約束方法



**図8**  
最も素朴な方法



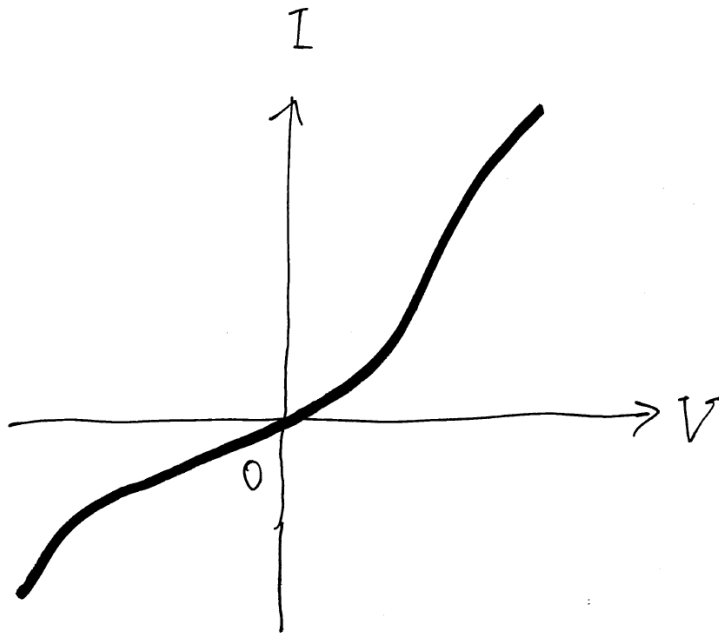
**図9A**  
これでも良い



**図9B**  
これでも良い

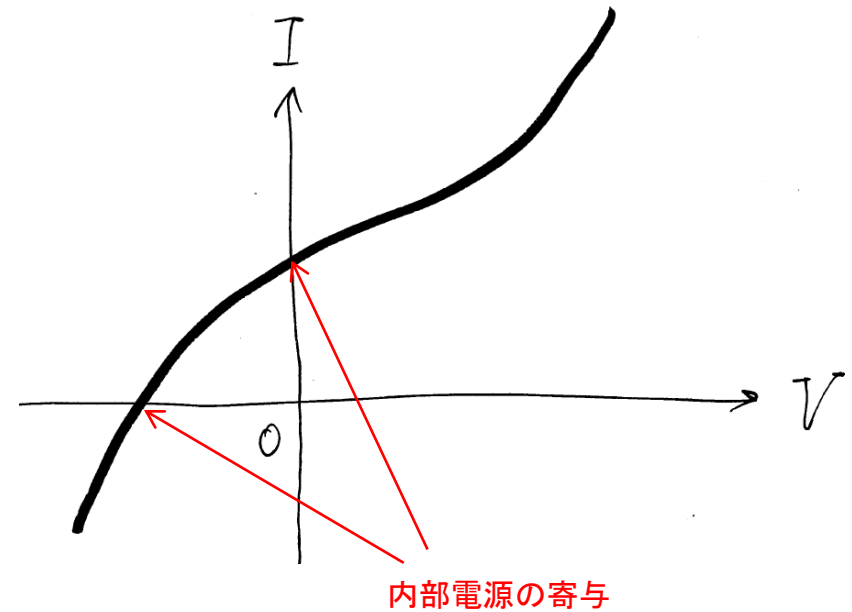
もしそれが自分にとって都合が良いならば、正の方向は、どのように約束しても良い。

## 電流・電圧特性 ( $I$ - $V$ 特性) の模式図



**図10**  
 $I$ - $V$ 特性の模式図(その1)

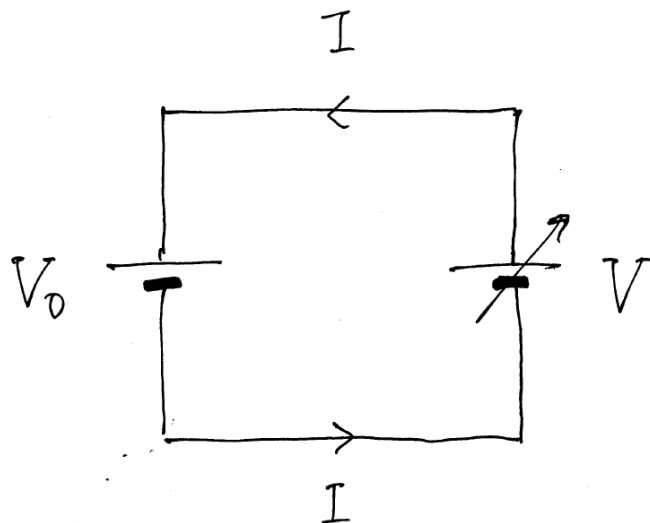
DUTが内部電源を含まない場合



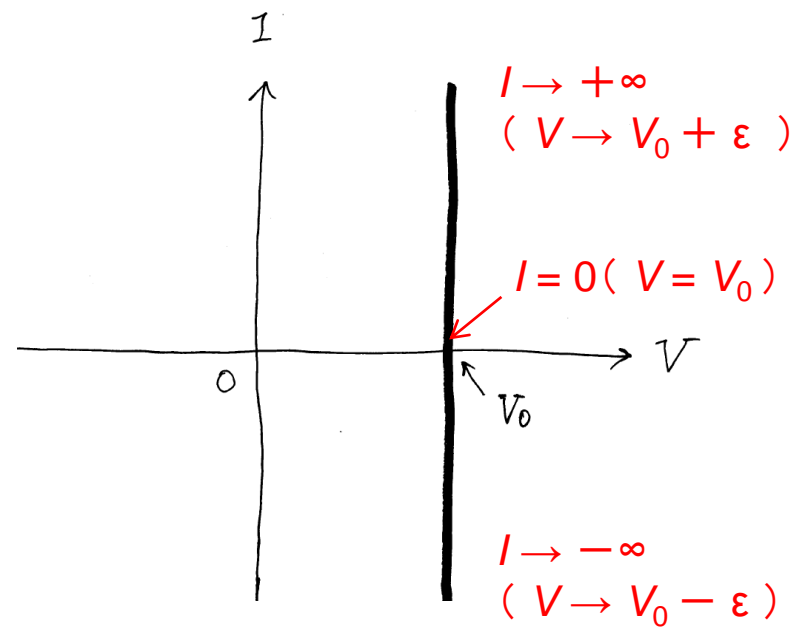
**図11**  
 $I$ - $V$ 特性の模式図(その2)

DUTが内部電源を含む場合

## 理想的な直流定電圧電源のI-V特性測定回路図とI-V特性



**図12**  
理想的な直流定電圧電源のI-V特性測定回路図



**図13**  
理想的な直流定電圧電源のI-V特性

図13において、 $V > V_0$ で $I = +\infty$ の電流が流れる理由は、外部電源(理想的な直流定電圧電源)の短絡電流が $\infty$ であると仮定されているからである。

また $V < V_0$ で $I = -\infty$ の電流が流れる理由は、DUT(理想的な直流定電圧電源)の短絡電流が $\infty$ であると仮定されているからである。

## 理想的な直流定電流電源のI-V特性測定回路図とI-V特性

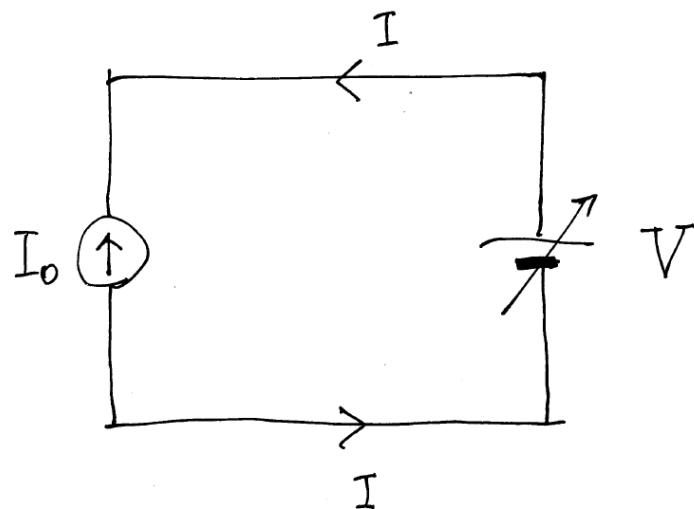


図14  
理想的な直流定電流電源のI-V特性測定回路図

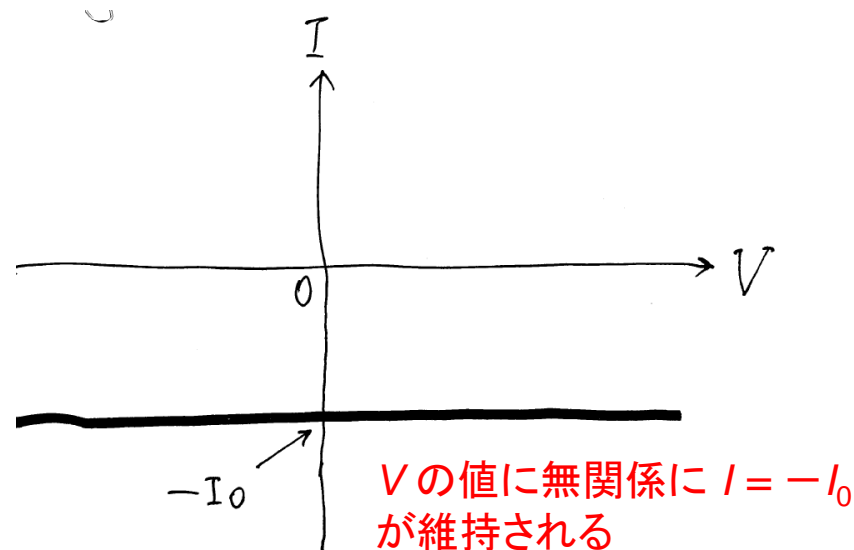


図15  
理想的な直流定電流電源のI-V特性

$V$ の値が $+\infty$ まで $I = -I_0$ が維持されている理由は、DUT(理想的な直流定電流電源)の開放電圧の値は $\infty$ であると仮定されているからである。

$V$ の値が $-\infty$ まで $I = -I_0$ が維持されている理由は、そのときの $V$ の方向はDUTが持つ起電力の方向に対して順方向なので、外部電源の電圧がDUTの起電力を妨げないからであろう。



# 第一種の直流定電圧電源のI-V特性測定回路図とI-V特性

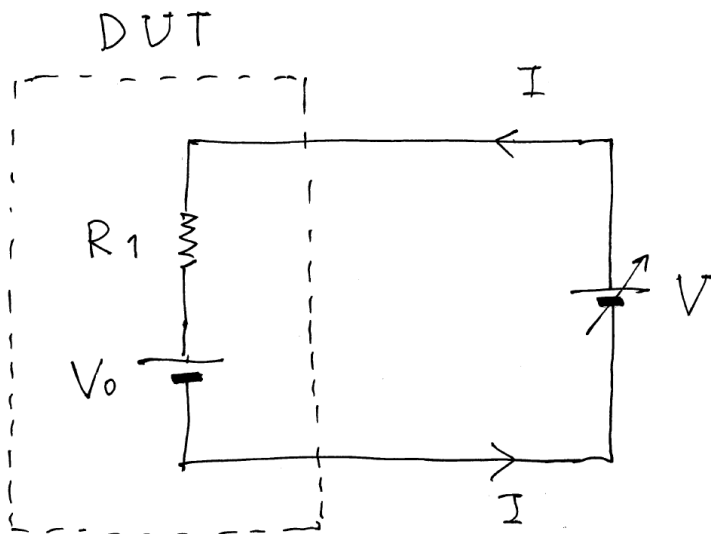


図16  
第一種の直流定電圧電源のI-V特性測定回路図

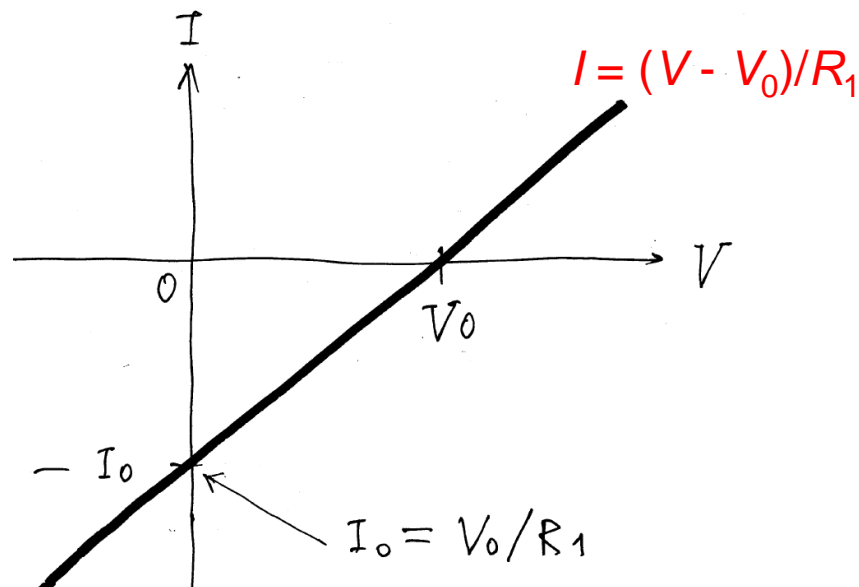
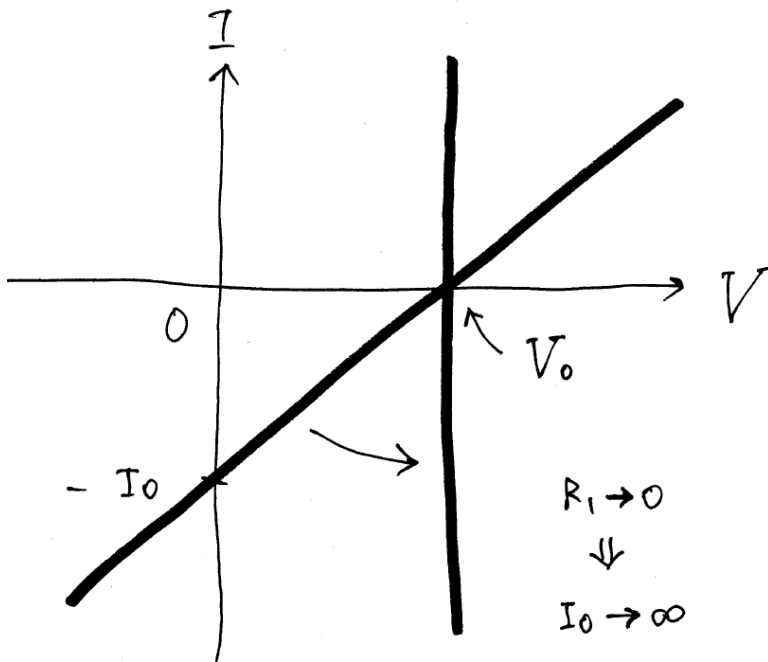


図17  
第一種の直流定電圧電源のI-V特性

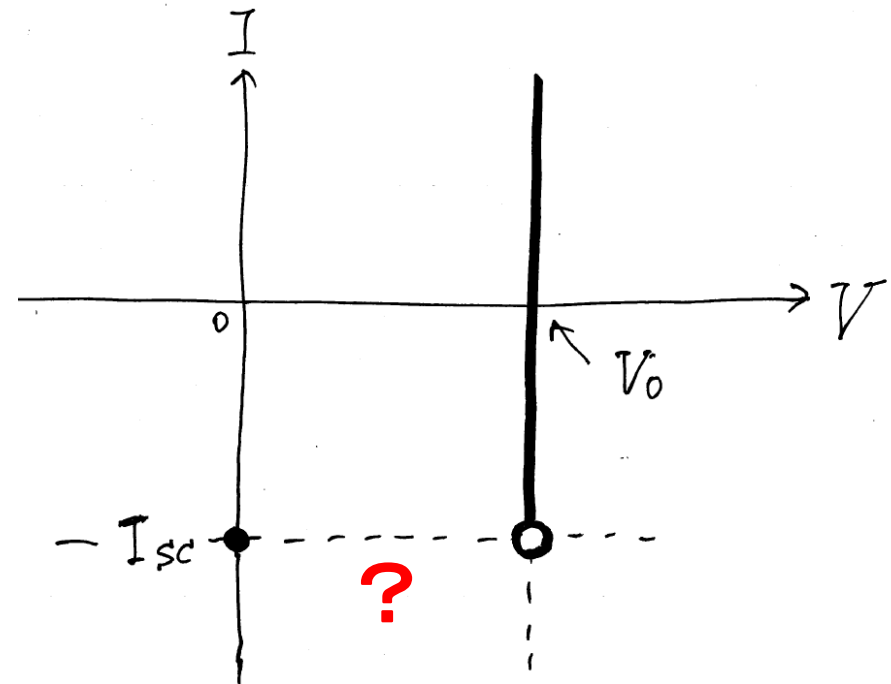
$$I_0 = V_0/R_1$$

$V > V_0$ ならば  $I > 0$  であり、電流は反時計方向に流れる。  
 このときは、電流  $I$  は DUT の電圧源  $V_0$  の内部を起電力の方向に対して逆流している。  
 $V < V_0$  ならば  $I < 0$  なので、電流は反時計方向に流れる。  
 このときは、電流  $I$  は外部電源の内部を起電力の方向に対して逆流している。

# 第一種の直流定電圧電源のI-V特性から理想的な直流定電圧電源のI-V特性を得る方法

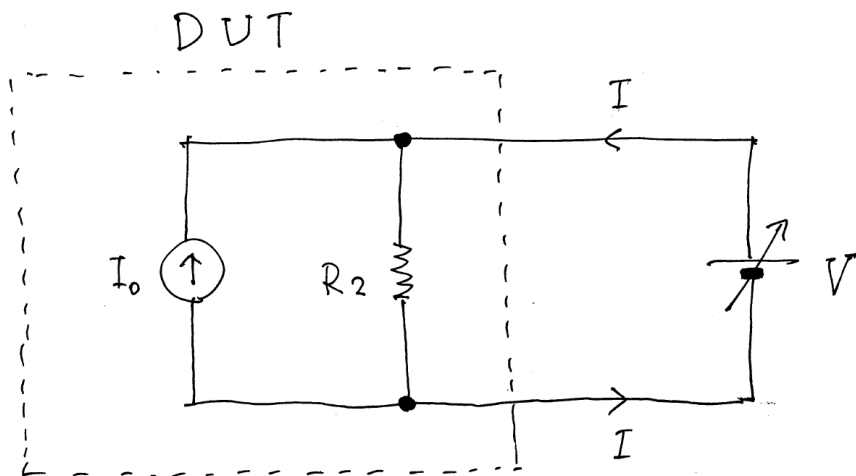


**図18**  
 第一種の直流定電圧電源のI-V特性から理想的な直流定電圧電源のI-V特性を得る方法

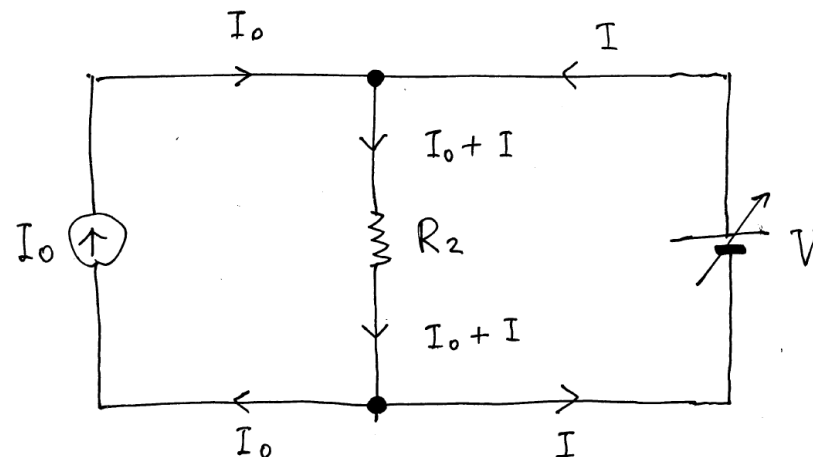


**図19**  
 理想的な直流定電圧電源の短絡電流が有限(=I<sub>sc</sub>)の場合のI-V特性

## 第一種の直流定電流電源のI-V特性測定回路図



**図20**  
第一種の直流定電流電源のI-V特性測定回路図



**図21**  
図20の測定回路の中を流れる電流

抵抗 $R_2$ を流れる電流は $I_0 + I$ のはずなので、抵抗 $R_2$ の両端に発生する電位差(電圧降下)は $R_2(I_0 + I)$ であり、それが電圧 $V$ に等しいはずなので、 $V = R_2(I_0 + I)$ を得る。

従って、最終的に  $I = V/R_2 - I_0$  を得るが、これが求めるI-V特性である。

# 第一種の直流定電流電源のI-V特性

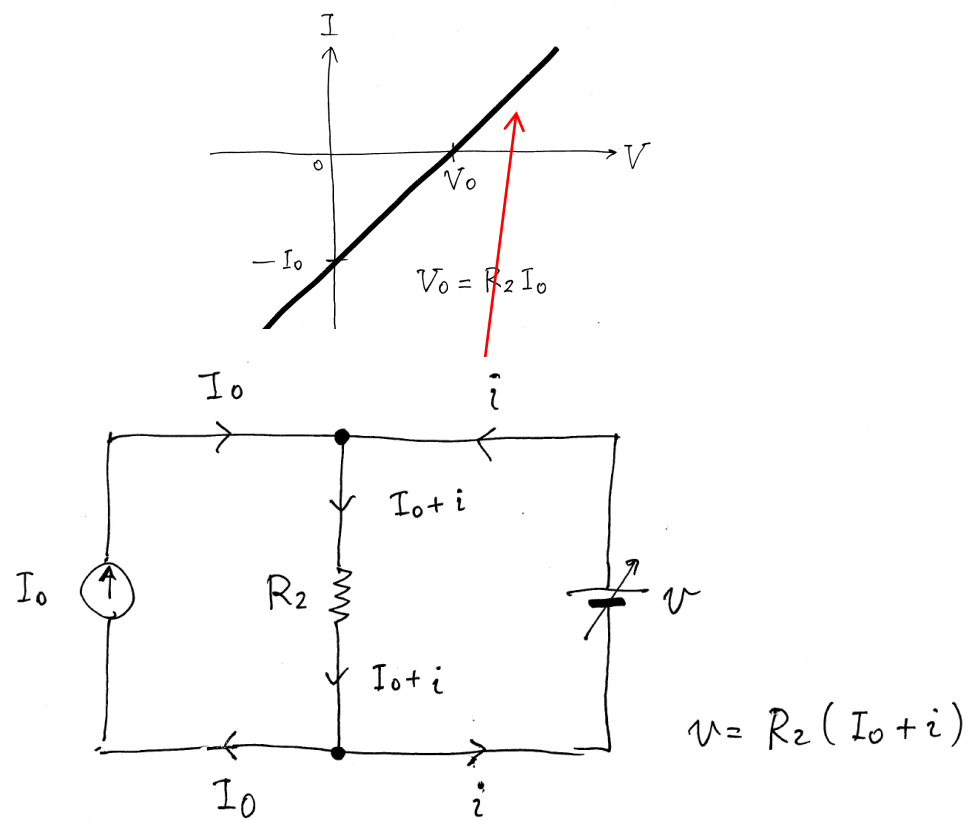
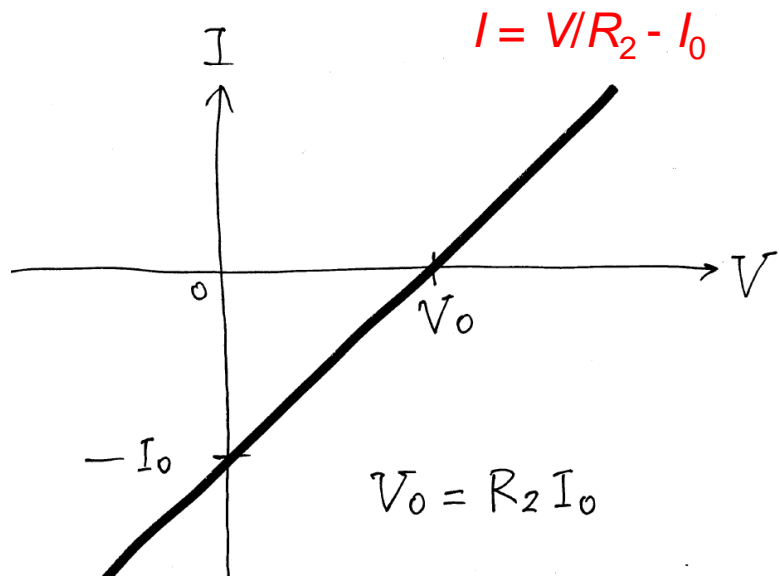


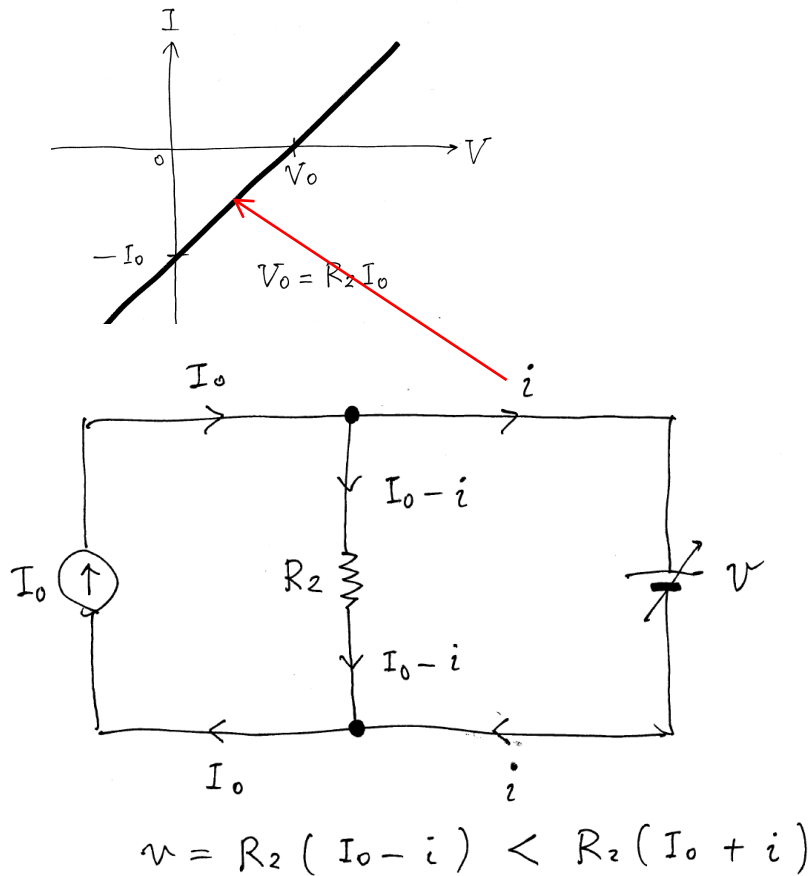
図22 第一種の直流定電流電源のI-V特性

図23  $V > V_0$ のときに、図20の測定回路の中を流れる電流

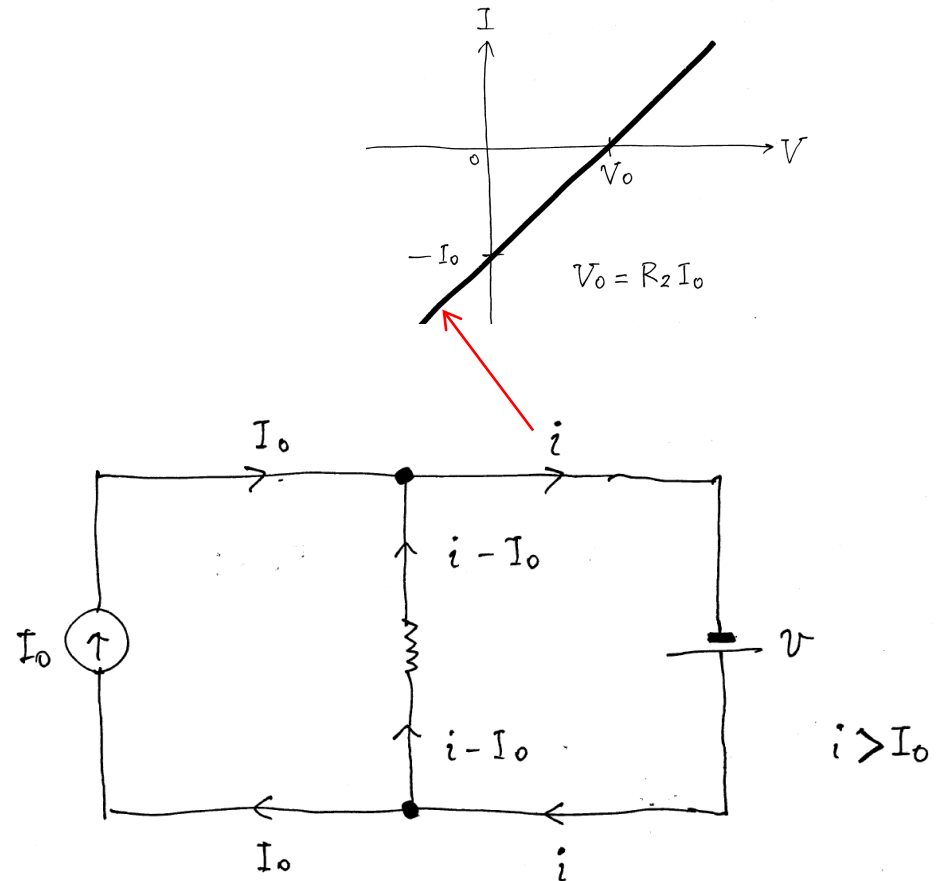
$V_0 = I_0 R_2$

抵抗 $R_2$ を流れる電流は  $I_0 + I (= I_0 + i)$  となる。 $V = R_2(I_0 + I) = R_2(I_0 + i)$

## 第一種の直流定電流電源のI-V特性


**図24**

$0 < V < V_0$ のときに、図20の測定回路の中を流れる電流


**図25**

$V < 0$ のときに、図20の測定回路の中を流れる電流

抵抗  $R_2$  を流れる電流は  $I_0 + I (= I_0 + i)$  となる。  $V = R_2 (I_0 + I) = R_2 (I_0 - i) < R_2 I_0 = V_0$

# 第一種の直流定電流電源のI-V特性から理想的な直流定電流電源のI-V特性を得る方法

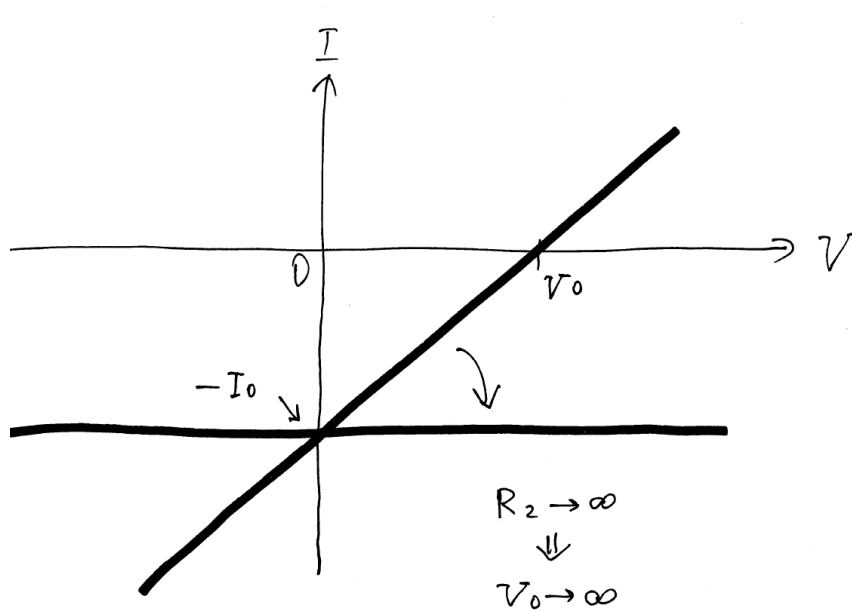


図26  
第一種の直流定電流電源のI-V特性から理想的な直流定電流電源のI-V特性を得る方法

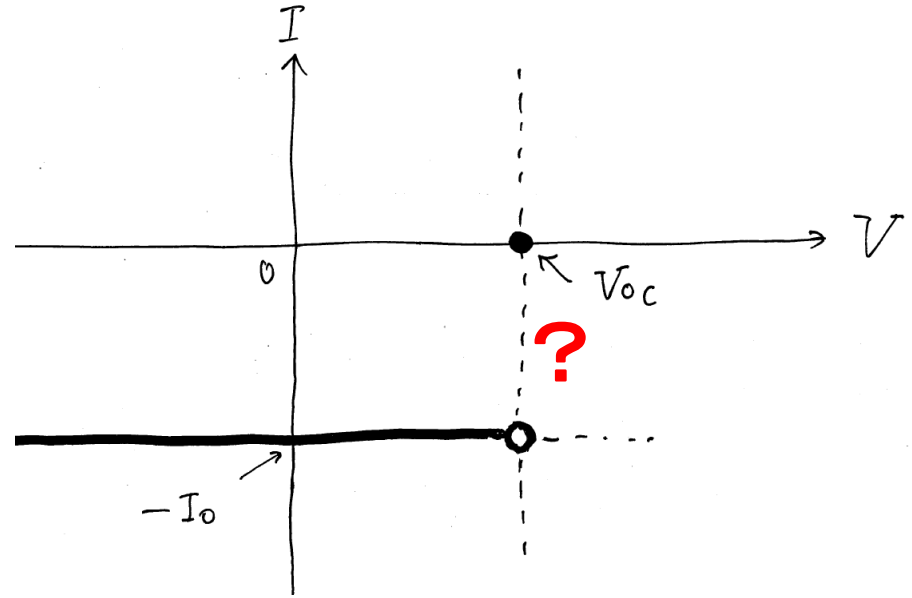


図27  
理想的な直流定電流電源の開放電圧が有限(=V<sub>OC</sub>)の場合のI-V特性

★ 図19と図27のI-V特性を足し合わせると、FF = 100%の太陽電池になる。

## 第一種の直流定電圧電源と第一種の直流定電流電源の等価性

図17のI-V特性と図22のI-V特性は、ほとんど同一であり、むしろ完全に同一であると見なすべきである。

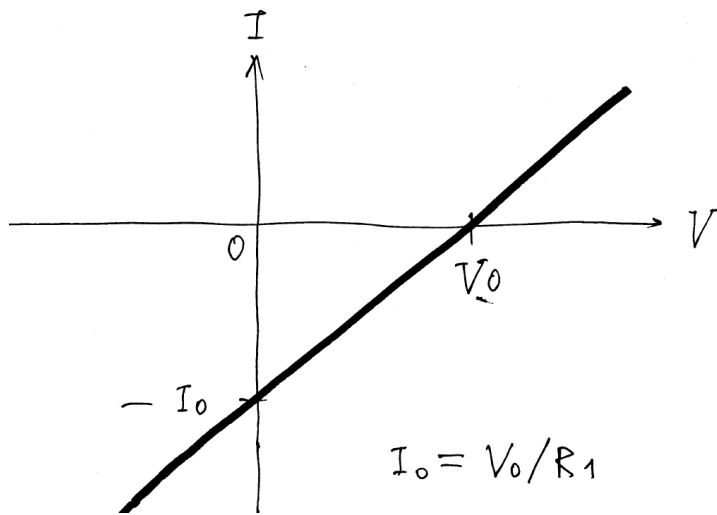


図17  
第一種の直流定電圧電源のI-V特性

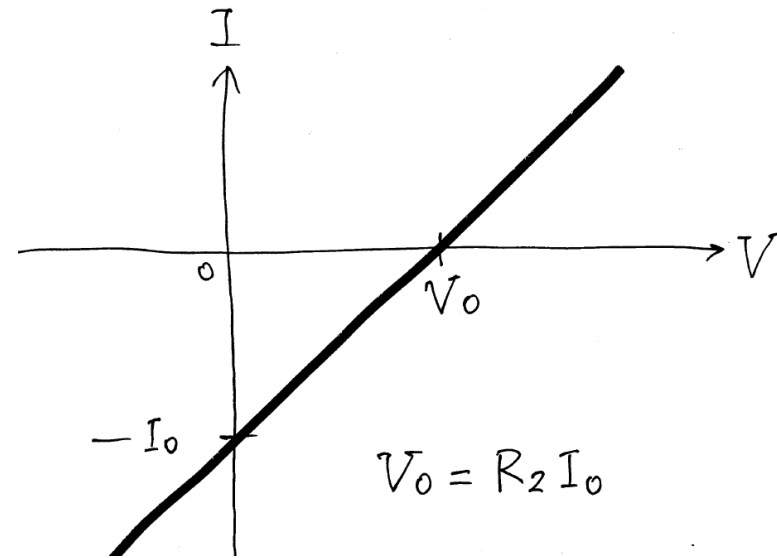


図22  
第一種の直流定電流電源のI-V特性

# テブナンの定理とノートンの定理

## テブナンの定理 (Thevenin's theorem)

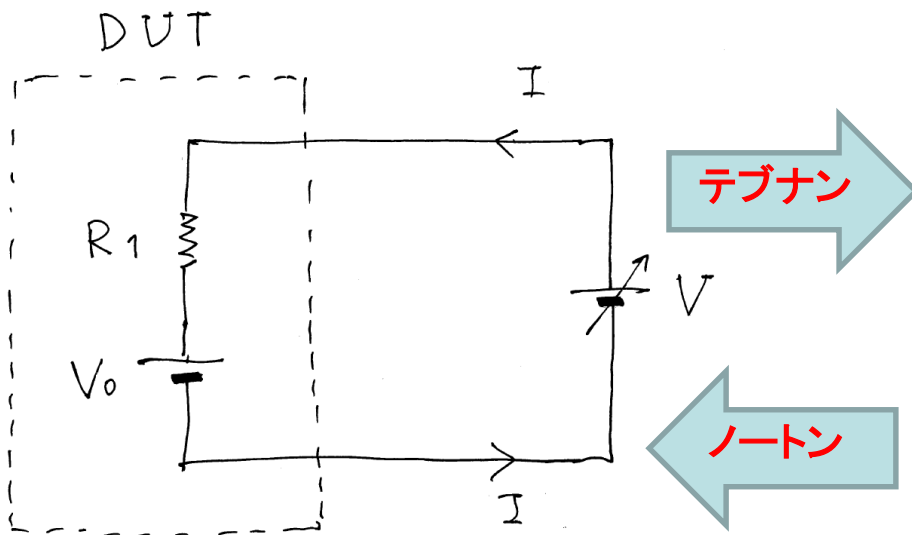
複数の直流電源と抵抗から構成される回路網において、回路網中の任意の2点を外部からみたとき、その回路網は1つの電圧源と1つの抵抗が直列に接続された回路で置き換えることができる。

## ノートンの定理 (Norton's theorem)

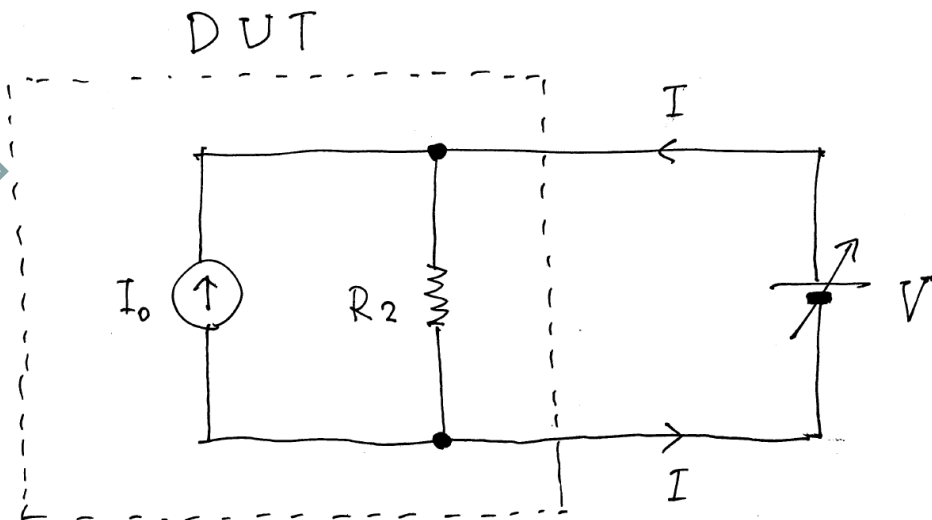
複数の直流電源と抵抗から構成される回路網において、回路網中の任意の2点を外部からみたとき、その回路網は1つの電流源と1つの抵抗が並列に接続された回路で置き換えることができる。



## テブナンの定理とノートンの定理を使った解釈



**図16**  
 第一種の直流定電圧電源のI-V特性測定回路図



**図20**  
 第一種の直流定電流電源のI-V特性測定回路図

図16の回路は、 $V_0$ と $R_1$ の値を $I_0 = V_0/R_1$ となるように選ぶならば、図20で示された第一種の直流定電流電源の、テブナン等価回路である。

図20の回路は、 $I_0$ と $R_2$ の値を $V_0 = R_2 I_0$ となるように選ぶならば、図16で示された第一種の直流定電圧電源の、ノートン等価回路である。

図16と図20の回路は、互いに相手のテブナン等価回路とノートン等価回路の関係になっている。

## I-V特性を解釈する方法

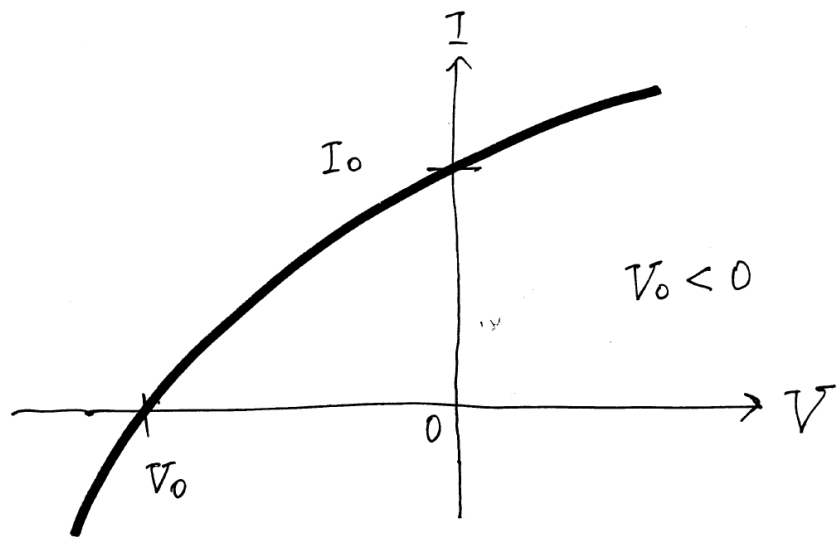


図28  
あるDUTのI-V特性を測定した結果の例

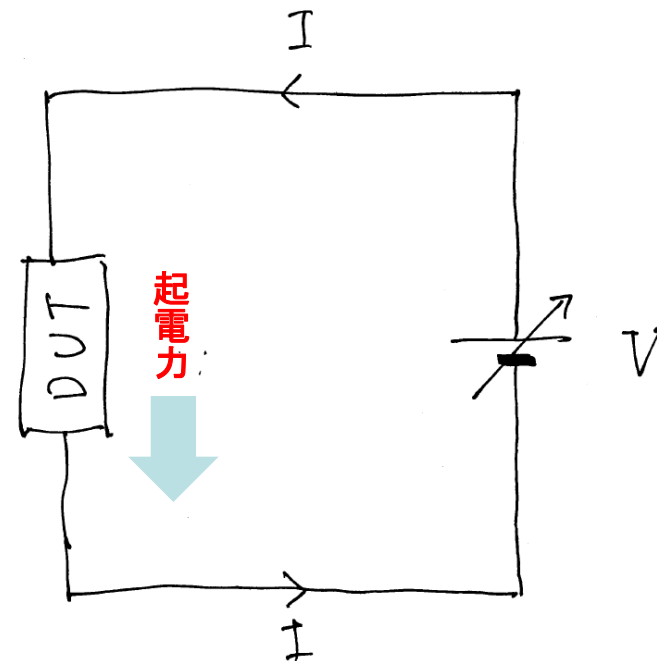


図29  
図28のI-V特性を得たときの電圧Vや電流Iの正の方向の約束

I-V特性を考えると、それが測定された電気回路における電圧Vと電流Iの正の方向を、常にセットで考える必要がある。

(1)  $V_0 < V < 0$  のとき

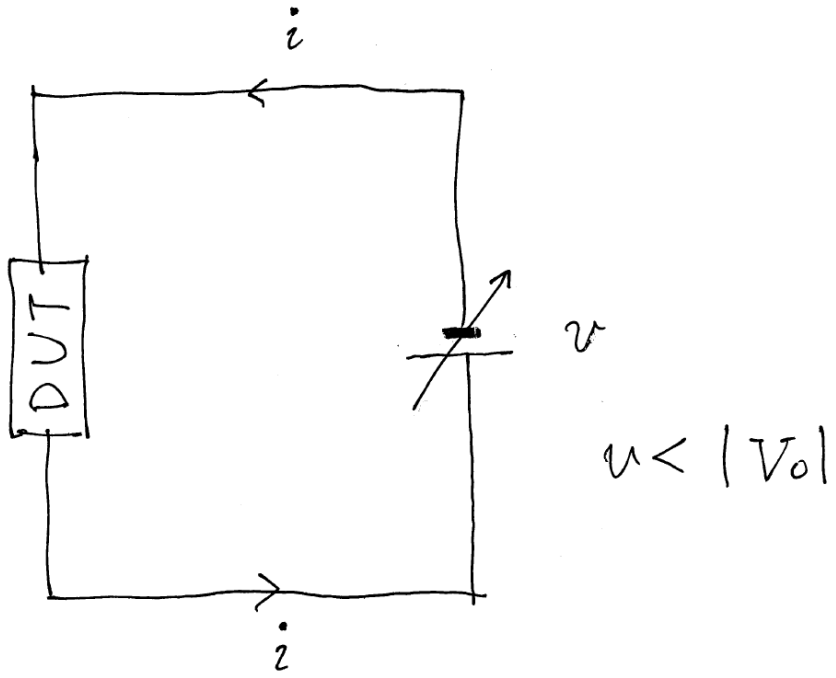


図30  
 $V_0 < V < 0$ のときにDUTの内部を流れる電流

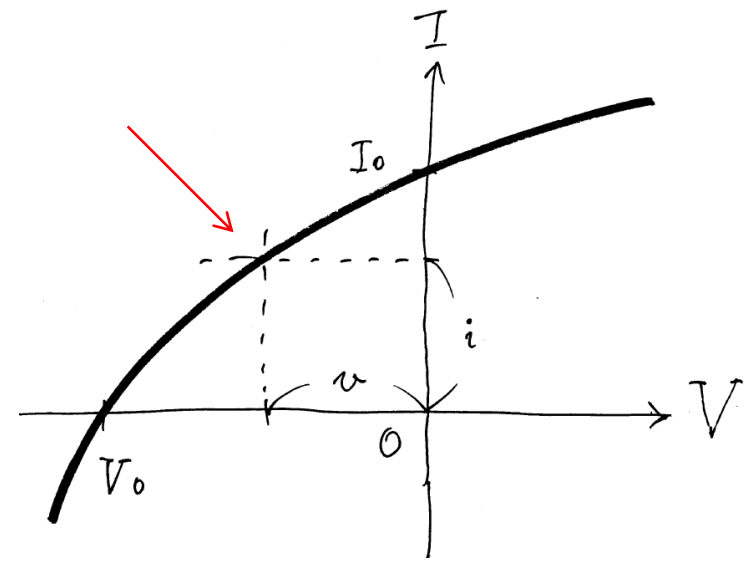
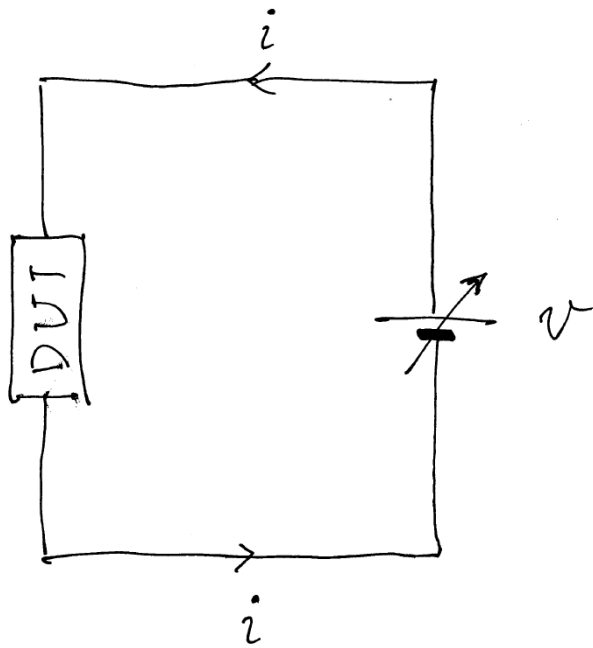


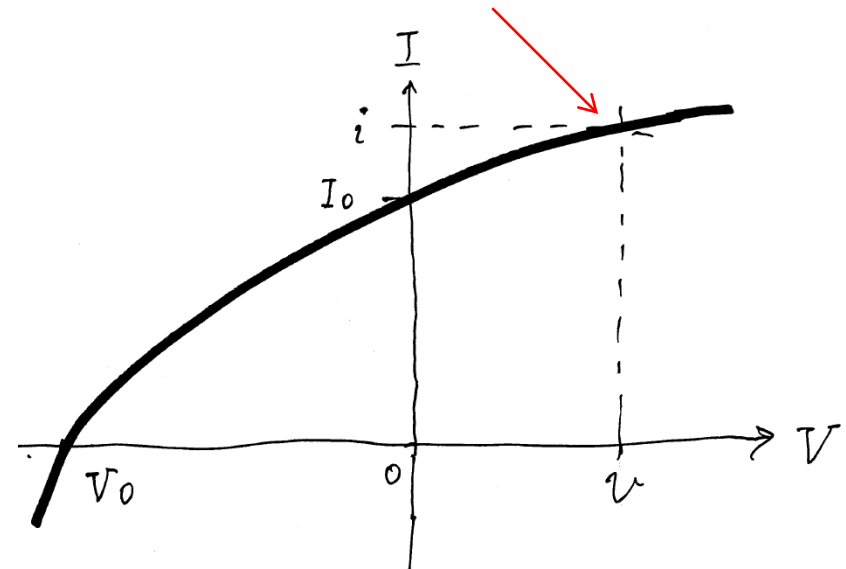
図31  
 図30の結果をI-V特性を使って解釈した結果

電流  $I = i > 0$  は外部電源の内部を起電力の方向に対して逆流している。

## (2) $V > 0$ のとき



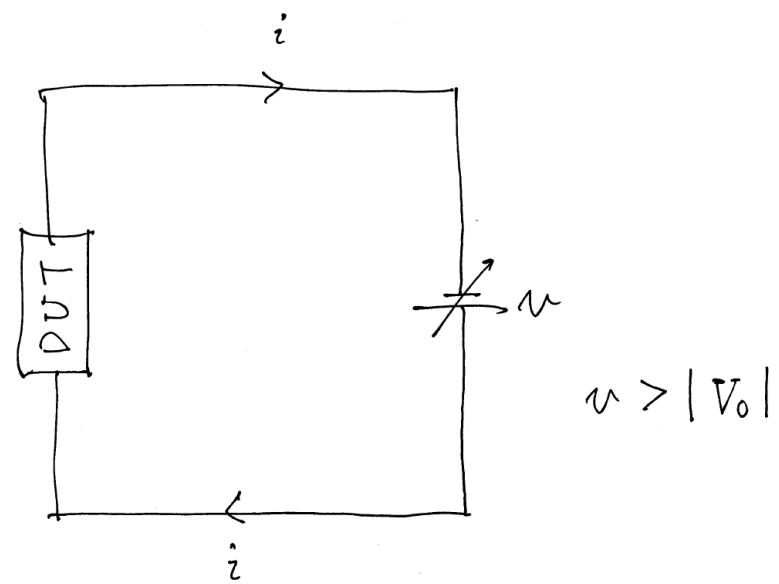
**図32**  
 $V > 0$  のときに DUT の内部を流れる電流



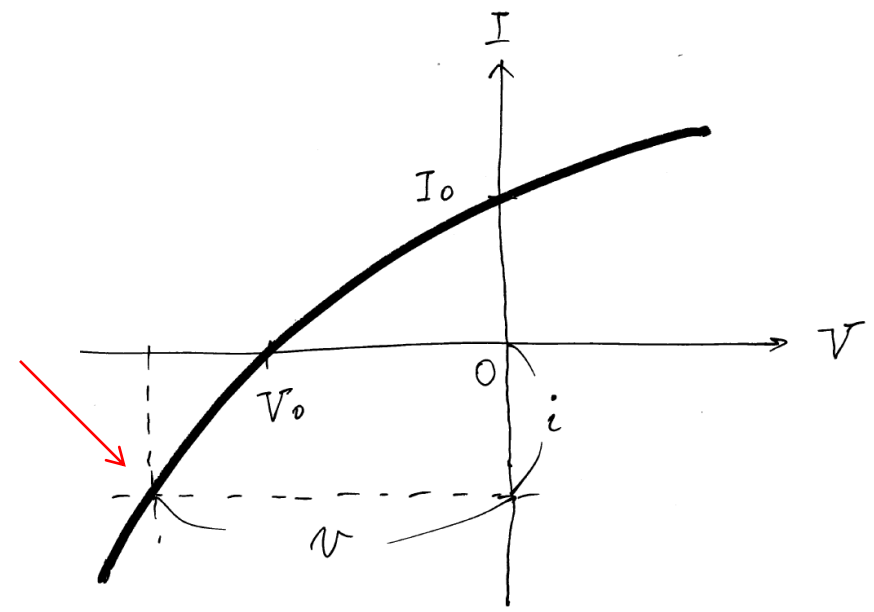
**図33**  
 図32の結果を  $I$ - $V$  特性を使って解釈した結果

電流  $I = i > 0$  は外部電源の内部を起電力の方向と同じ方向に流れている。

### (3) $V < V_0$ のとき



**図34**  
 $V < V_0$  のときにDUTの内部を流れる電流



**図35**  
 図32の結果をI-V特性を使って解釈した結果

電流  $I = i < 0$  は外部電源の内部を起電力の方向と同じ方向に流れている。

## 複数のDUTを含む系のI-V特性を求める方法

### (1) 並列接続の場合



図36  
2種類のDUTのI-V特性を、個別に測定した結果

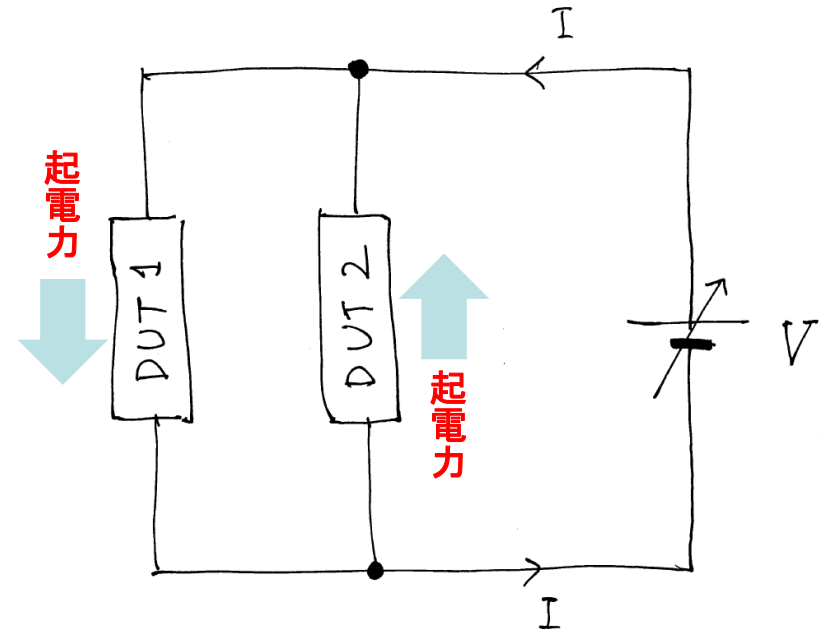


図37  
2個のDUTが並列に接続された系のI-V特性を求めるための測定回路図と、電圧Vや電流Iの正の方向の約束

I-V特性を考えると、それが測定された電気回路における電圧Vと電流Iの正の方向を、常にセットで考える必要がある。

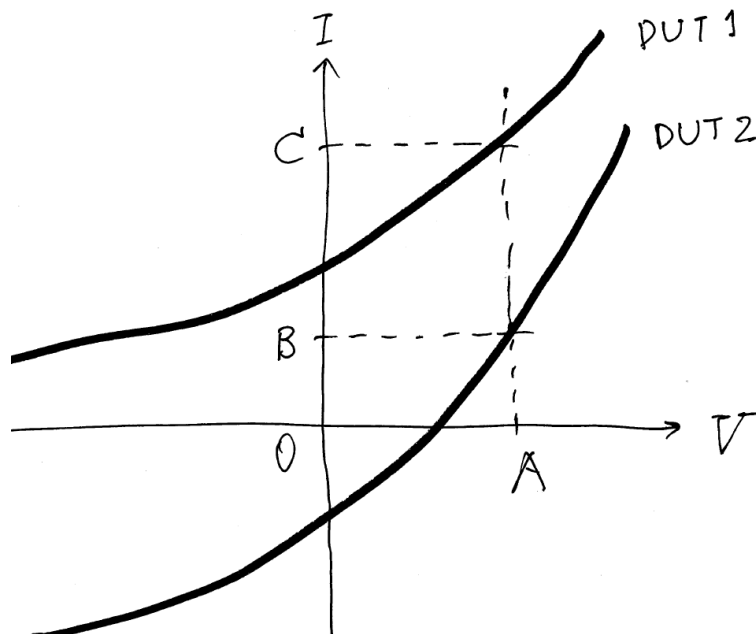

**図38**

図37において  $V = A$  であるときに、  
個々のDUTを流れる電流

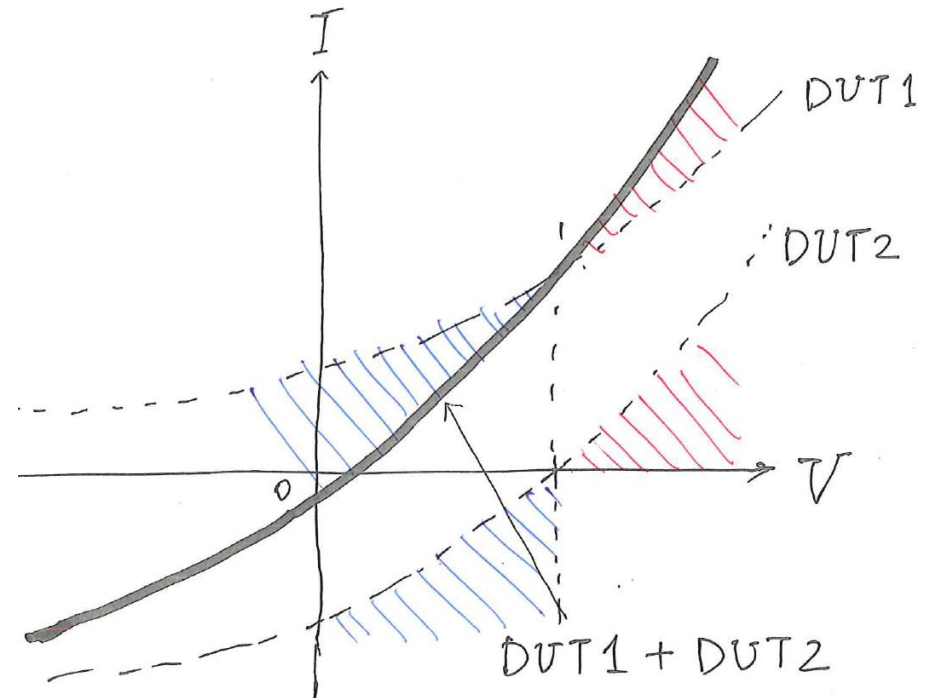
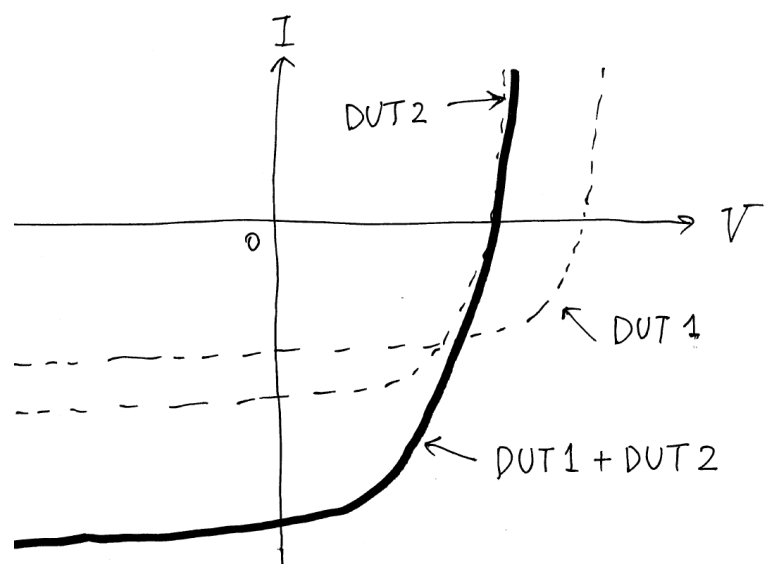

**図39**

図37のDUT1+DUT2のI-V特性を  
求める方法

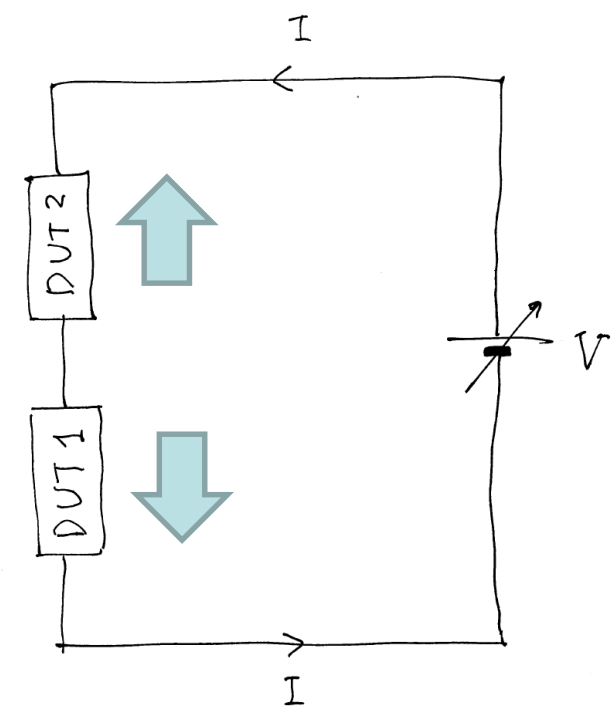
図39のI-V特性は、図36に描かれている2本の曲線を、**縦方向に(電流の符号の正負を考慮に入れながら)足し合わせた曲線**である。

この結論は非常に一般的であり、図36の例のように単独のDUTのI-V特性がグラフの座標原点を通過しない場合(すなわち、DUT1やDUT2が内部電源を含んでいる場合)にも成立する。

## (2) 直列接続の場合



**図40**  
2種類の太陽電池を並列接続して2端子素子とした系のI-V特性と電圧整合条件



**図41**  
2個のDUTが直列に接続された系のI-V特性を求めるための測定回路図と、電圧Vや電流Iの正の方向の約束

I-V特性を考えるときは、それが測定された電気回路における電圧Vと電流Iの正の方向を、常にセットで考える必要がある。(図41)



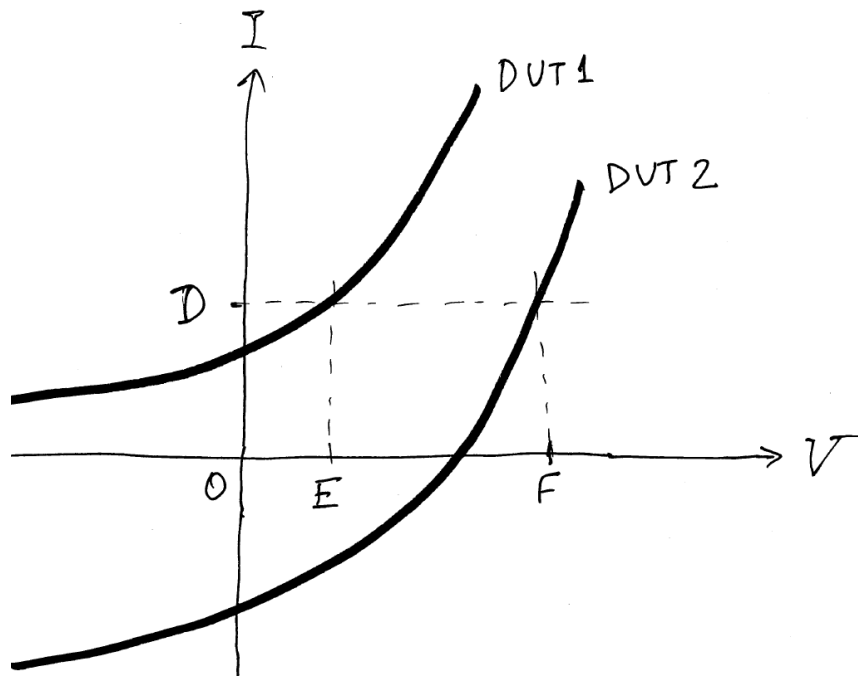

**図42**

図41において  $I = D$  であるときに、  
個々のDUTの両端に発生する電圧

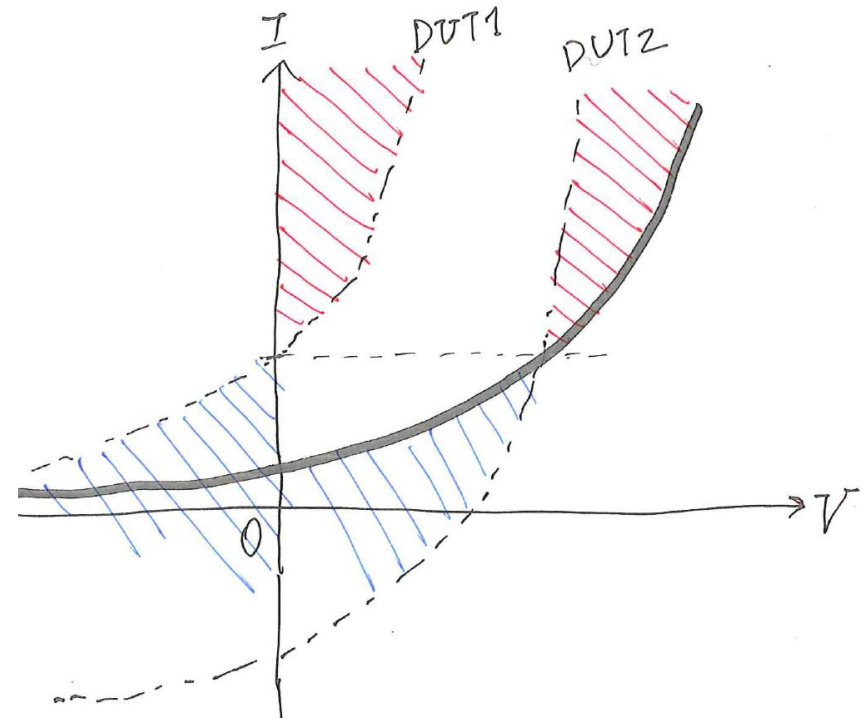
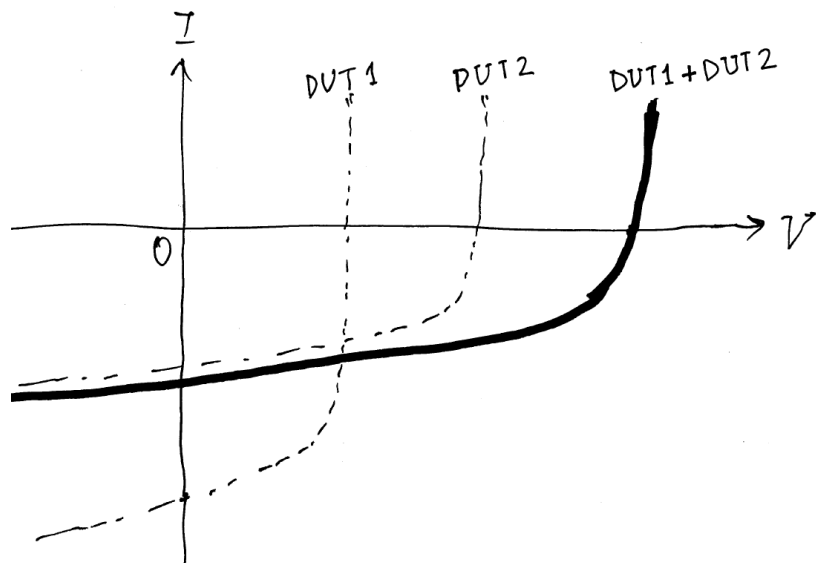

**図43A**

図41のDUT1+DUT2のI-V特性を  
求める方法

図43AのI-V特性は、図42に描かれている2本の曲線を、**横方向に(電圧の符号の正負を考慮に入れながら)**  
**足し合わせた**曲線である。

この結論は非常に一般的であり、図42の例のように単独のDUTのI-V特性がグラフの座標原点を通過しない  
場合(すなわち、DUT1やDUT2が内部電源を含んでいる場合)にも成立する。



**図43B**  
 2種類の太陽電池を直列接続して  
 2端子素子とした系のI-V特性と電  
 流整合条件

### <定理1>

DUT1およびDUT2を並列に接続した系のI-V特性は、DUT1およびDUT2のI-V曲線を、**縦方向(電流軸方向)に(電流の符号の正負を考慮に入れながら)足し合わせた曲線**で与えられる。

### <定理2>

DUT1およびDUT2を直列に接続した系のI-V特性は、DUT1およびDUT2のI-V曲線を、**横方向(電圧軸方向)に(電圧の符号の正負を考慮に入れながら)足し合わせた曲線**で与えられる。

3個以上の場合についても、<定理1>と<定理2>の作業を繰り返すことにより、求めることが可能である

# 第3章 現実的な電源のI-V特性

## 太陽電池の最も素朴なモデル

## 更に現実的な電源のモデル: 第二種の電源

理想的な定電圧電源の短絡電流と理想的な定電流電源の開放電圧は、共に $\infty$ である。

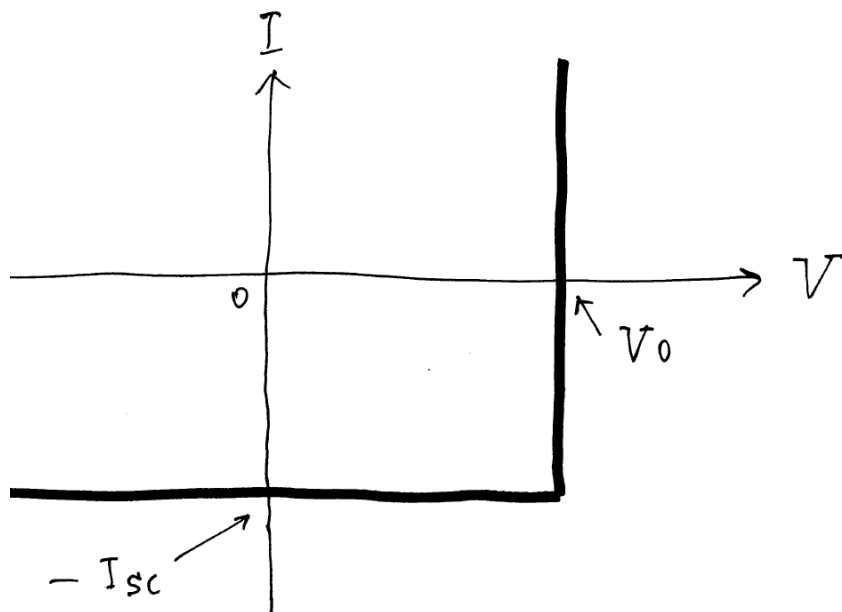
しかしながら、現実の電源では、短絡電流および開放電圧の値は有限である。

従って、理想的な電源に対して **有限の短絡電流や開放電圧を持つ** という修正(のみ)を施した電源を考えて、“第二種の電源”と命名し、表3のように定義する。

表3 第二種の電源の定義

電源の種類	発生電圧 発生電流	内部抵抗	開放電圧	短絡電流
第二種の直流定電圧電源	$V_0$	ゼロ	$V_0$	$I_{SC}$
第二種の直流定電流電源	$I_0$	$\infty$	$V_{OC}$	$I_0$

## 第二種の直流定電圧電源のI-V特性



**図44**  
第二種の直流定電圧電源のI-V特性

I-V特性を得るときの電圧  $V$  や電流  $I$  の正の方向の約束は、図29であるとする

図13では  $I_{sc} = \infty$  だったので、短絡に近い終端をして  $V \rightarrow V_0 - \varepsilon$  とすると  $I \rightarrow -\infty$  であった。

しかし、このDUT(第二種の直流定電圧電源)が発生できる電流の最大値が  $I_{sc}$  である ( $I_{sc} > 0$ ) ならば、 $V \rightarrow V_0 - \varepsilon$  とすると  $I \rightarrow -I_{sc}$  となり、それ以上は  $V$  の値を減少させても  $I$  の値は変化しないはずである。

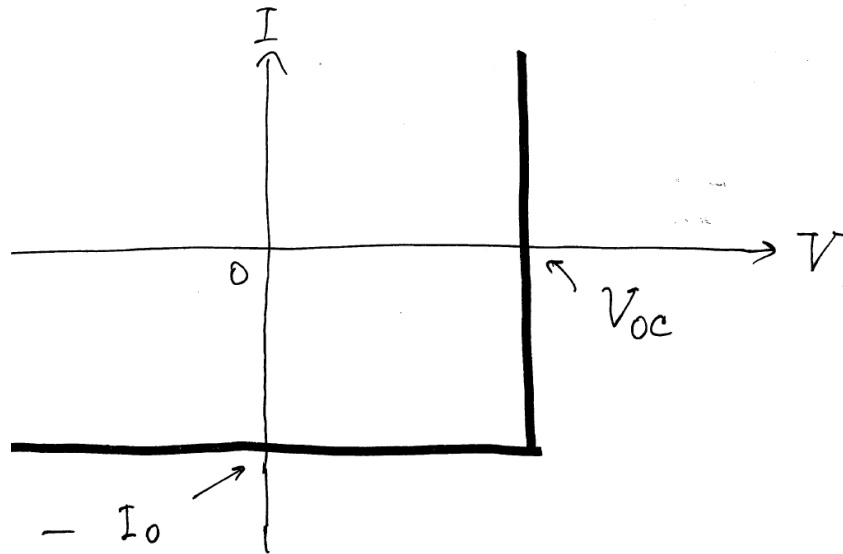
これは、DUTが発生する電流 (=  $I_{sc}$ ) が回路を流れる電流  $I$  を律速しているからである。

これは、 $V < V_0$  ではDUTは(発生電流が  $I_{sc}$  であるような)理想的な直流定電流電源として振る舞う、ということの意味している。

$V < V_0$  では  $V$  の値を減少させても  $I$  の値が変化しないということは、 $V < V_0$  ではI-V特性は横軸に平行な直線になっていることを意味する。

従って、表3に示された第二種の直流定電圧電源のI-V特性は、図44のようになる。

## 第二種の直流定電流電源のI-V特性



**図45**  
第二種の直流定電流電源のI-V特性

I-V特性を得るときの電圧 $V$ や電流 $I$ の正の方向の約束は、図29であるとする

開放電圧の定義に立ち返って考えて見ると、 $V = V_{OC} - \varepsilon$ まではDUTの内部を流れる電流は $I_0$ であるが、 $V = V_{OC}$ に到達した瞬間にDUTの内部を流れる電流はゼロになる。

そして、その後も $V = V_{OC}$ を維持するためには、DUTの起電力が $V_{OC}$ に到達した時点で、DUTの内部抵抗が突然にゼロになる必要がある。

これは、 $V > V_{OC}$ ではDUTは(起電力が $V_{OC}$ であるような)理想的な直流定電圧電源として振る舞う(必要がある)、ということを意味している。

その結果として、 $V = V_{OC} + \varepsilon$ においては、DUTの内部を流れる電流は $+\infty$ になる。

以上の結果から判断すると、表3に示された第二種の直流定電流電源のI-V特性は、図45のようになることが分かる。

## 第二種の直流定電圧電源と第二種の直流定電流電源の等価性

図44と図45を見比べると、 $V_{OC}$ を $V_0$ と読み替え、また $I_{SC}$ を $I_0$ と読み替えるならば、両者は全く同一のI-V特性であることが分かる。

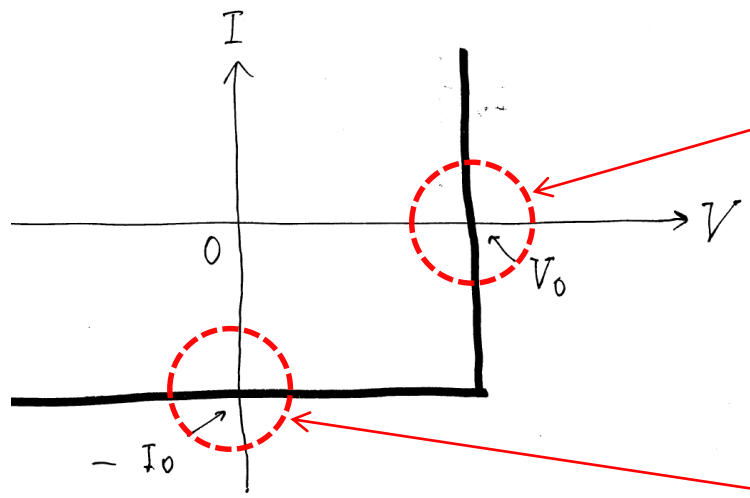
従って、発生電圧が $V_0$ で短絡電流が $I_0$ であるような第二種の直流定電圧電源は、発生電流が $I_0$ で開放電圧が $V_0$ であるような第二種の直流定電流電源と同一である。

従って、以下においては、これを統一して、**第二種の直流電源**と呼ぶことにする。この第二種の直流電源の性質を表3に追記して示すと、表4のようになる。

表4 第二種の直流電源の定義

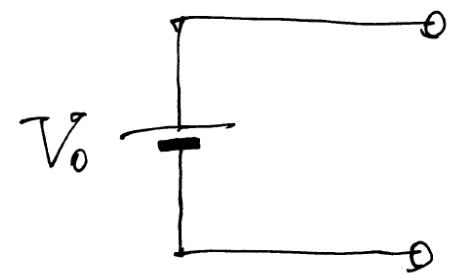
電源の種類	発生電圧 発生電流	内部抵抗	開放電圧	短絡電流
第二種の直流定電圧電源	$V_0$	ゼロ	$V_0$	$I_{SC}$
第二種の直流定電流電源	$I_0$	$\infty$	$V_{OC}$	$I_0$
<b>第二種の直流電源</b>	<b><math>V_0, I_0</math></b>	<b>理想的</b>	<b><math>V_0</math></b>	<b><math>I_0</math></b>

## 統一的な電源: 第二種の直流電源

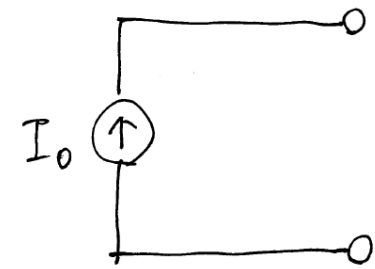


**図46**  
第二種の直流電源のI-V特性

I-V特性を得るときの電圧Vや電流Iの正の方向の約束は、図29のようであるとする



**図47**  
 $V \doteq V_0$ における第二種の直流電源のテブナン等価回路



**図48**  
 $I \doteq I_0$ における第二種の直流電源のノートン等価回路

★この第二種の直流電源は、 $FF = 100\%$ である太陽電池そのものである。



第二種の直流電源に対して**有限の値の内部抵抗を追加する**という修正を施すことにより、これを更に現実的な直流電源に近付けることが可能である。

有限の値の内部抵抗を追加する方法は、以下の4種類が考えられる。

- ・A **直列**抵抗として追加する。
- ・B **並列**抵抗として追加する。
- ・C **直列**抵抗と**並列**抵抗の両方を追加する。
- ・D **直列**抵抗と**並列**抵抗の両方を追加する。

第二種の直流電源に対して、上記A～Dの修正を施した結果を**第三種の直流電源**と呼び、表5のように命名する。

表5 第三種の電源の定義

電源の名称	直列抵抗	並列抵抗	開放電圧	短絡電流
第三種A型の直流電源	$R_1$	$\infty$	$V_0$	$I_0$
第三種B型の直流電源	ゼロ	$R_2$	$V_0$	$I_0$
第三種C型の直流電源	$R_1$	$R_2$	$V_0$	$< I_0$
第三種D型の直流電源	$R_1$	$R_2$	$< V_0$	$I_0$
ref. 第二種の直流電源 <sup>Ⓟ</sup>	ゼロ	$\infty$	$V_0$	$I_0$

第二種の直流電源の記号をⓅとおいて、表5に示す4種類(A~C型)の第三種の直流電源の等価回路図を図49~52に示す。

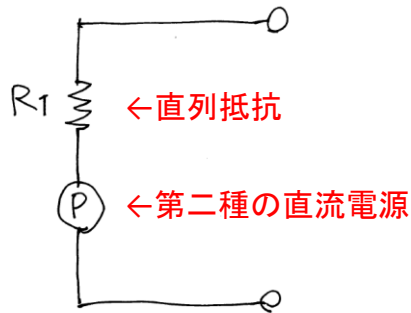


図49  
第三種A型の直流電源の等価回路

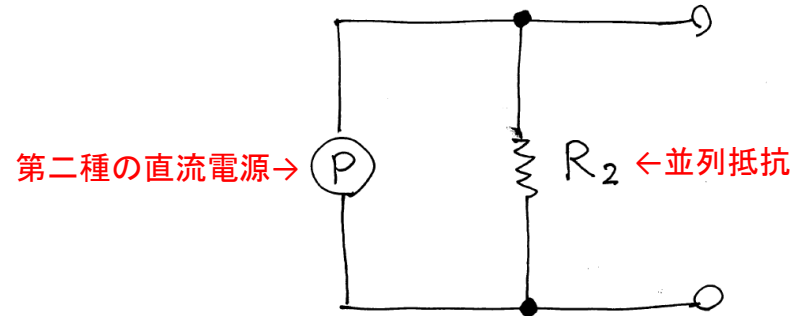


図50  
第三種B型の直流電源の等価回路

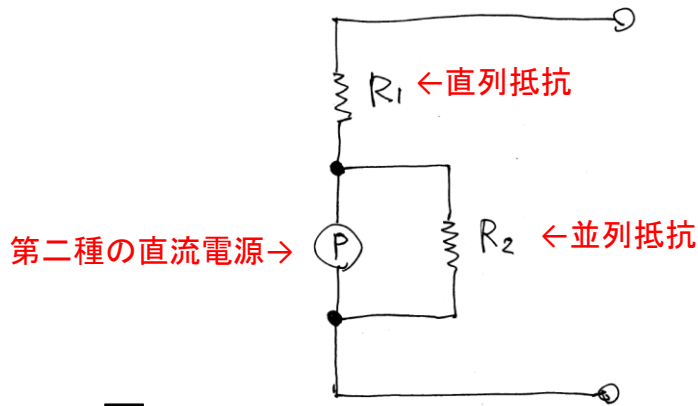


図51  
第三種C型の直流電源の等価回路

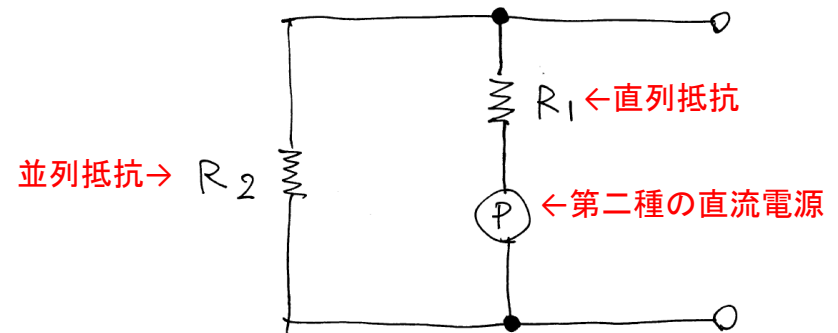
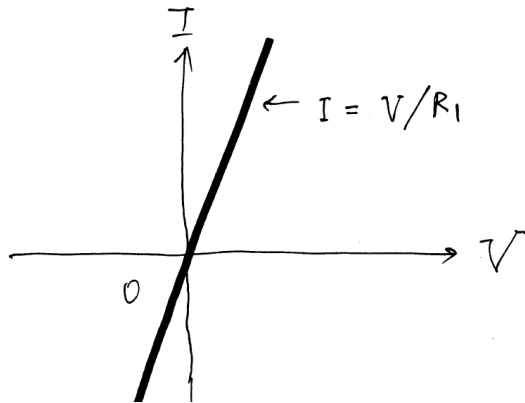
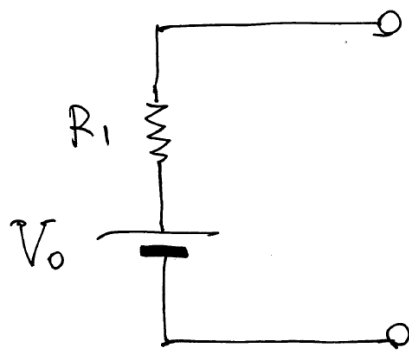


図52  
第三種D型の直流電源の等価回路

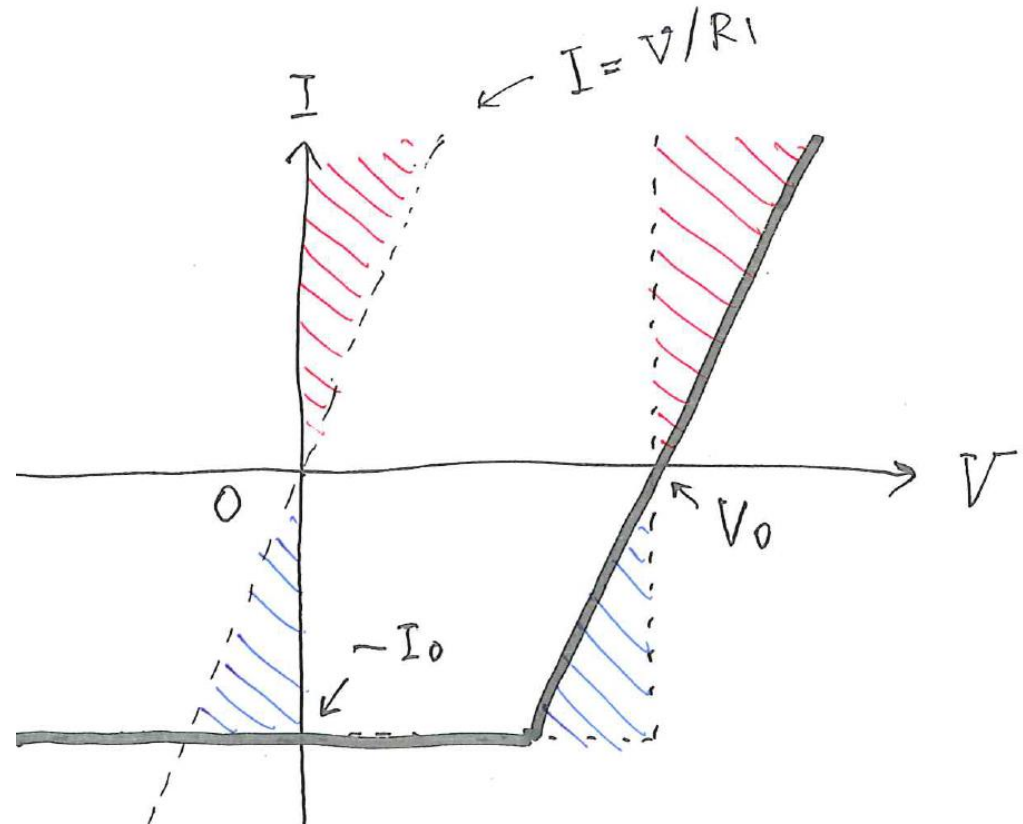
## 第三種A型の直流電源のI-V特性



**図53**  
直列抵抗 $R_1$ のI-V特性

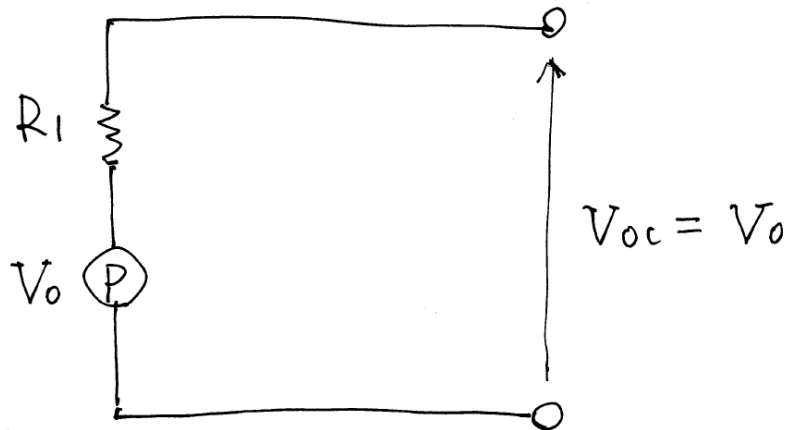


**図55**  
 $V = V_0$ における第三種A型の直  
流電源のテブナン等価回路



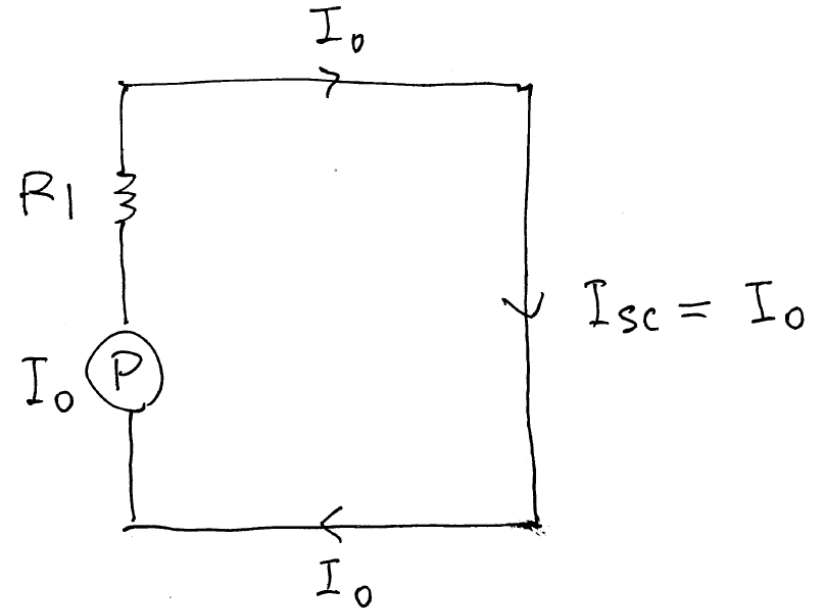
**図54A**  
第三種A型の直流電源のI-V特  
性

## 第三種A型の直流電源のI-V特性



**図54B**  
開放状態にある第三種A型の直  
流電源

$V_{oc} = V_0$  である。



**図54C**  
短絡状態にある第三種A型の直  
流電源

$I_{sc} = I_0$  である。

この場合は、 $R_1$  (直列抵抗) の挿入は開放電圧と短絡電流の値に影響を与えない。

### 第三種B型の直流電源のI-V特性

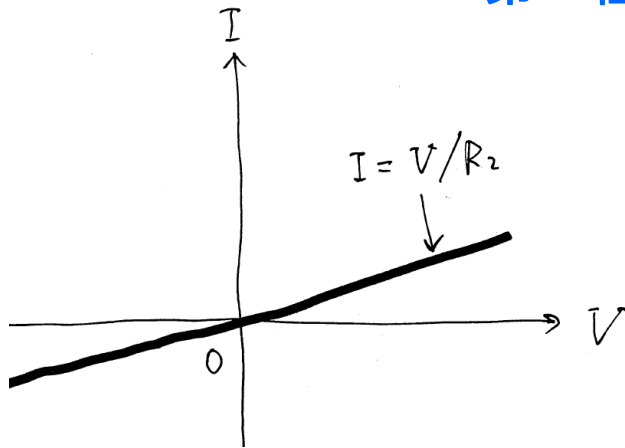


図56  
並列抵抗 $R_2$ のI-V特性

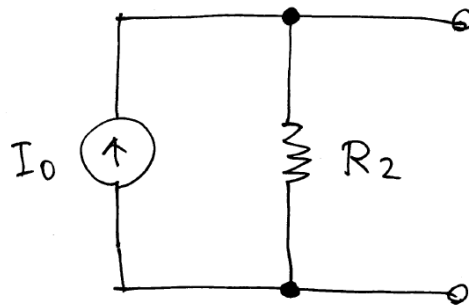


図58  
 $I \doteq I_0$ における第三種B型の直流電源のノートン等価回路

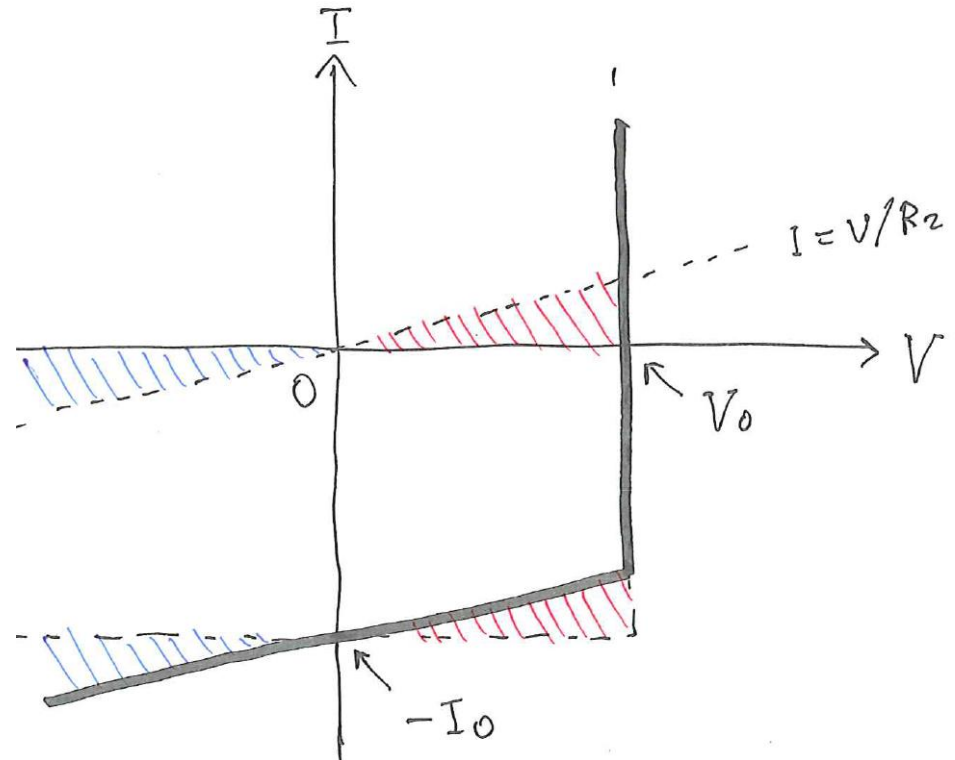
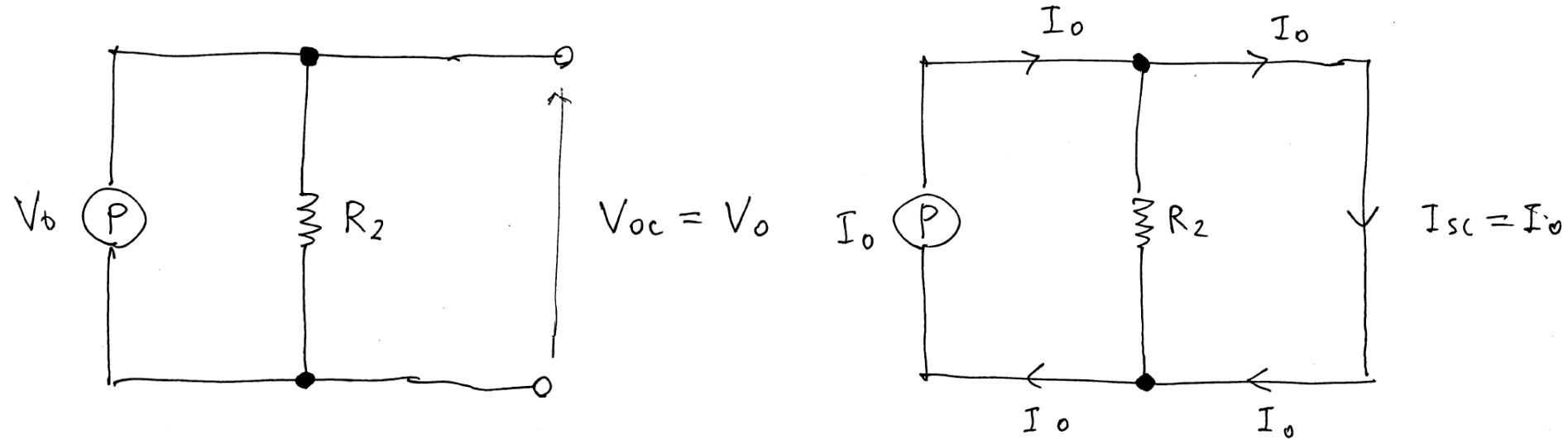


図57A  
第三種B型の直流電源のI-V特性

## 第三種B型の直流電源のI-V特性



**図57B**  
開放状態にある第三種B型の直流電源

$$V_{OC} = V_0 \text{ である。}$$

**図57C**  
短絡状態にある第三種B型の直流電源

$$I_{SC} = I_0 \text{ である。}$$

この場合は、 $R_2$ (真に列抵抗)の挿入は開放電圧と短絡電流の値に影響を与えない。

### 第三種C型の直流電源のI-V特性

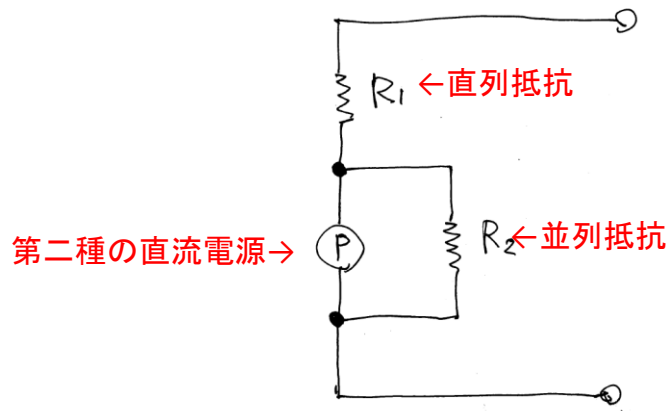


図51  
第三種C型の直流電源の等価回路

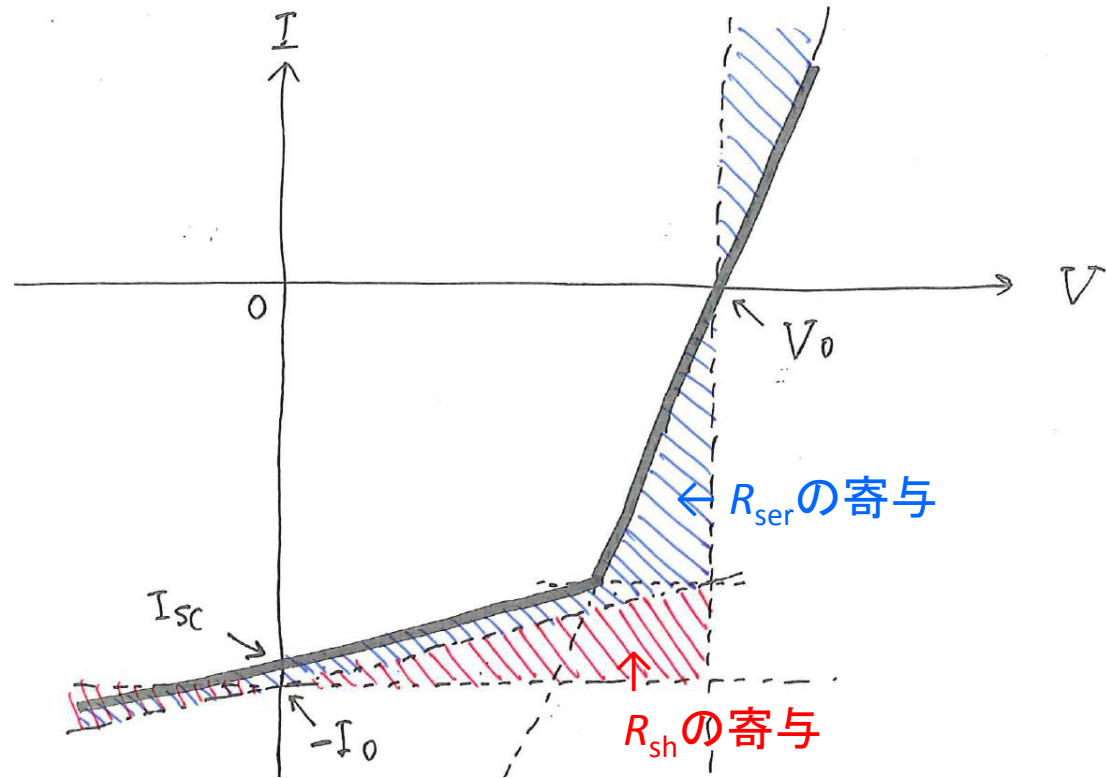
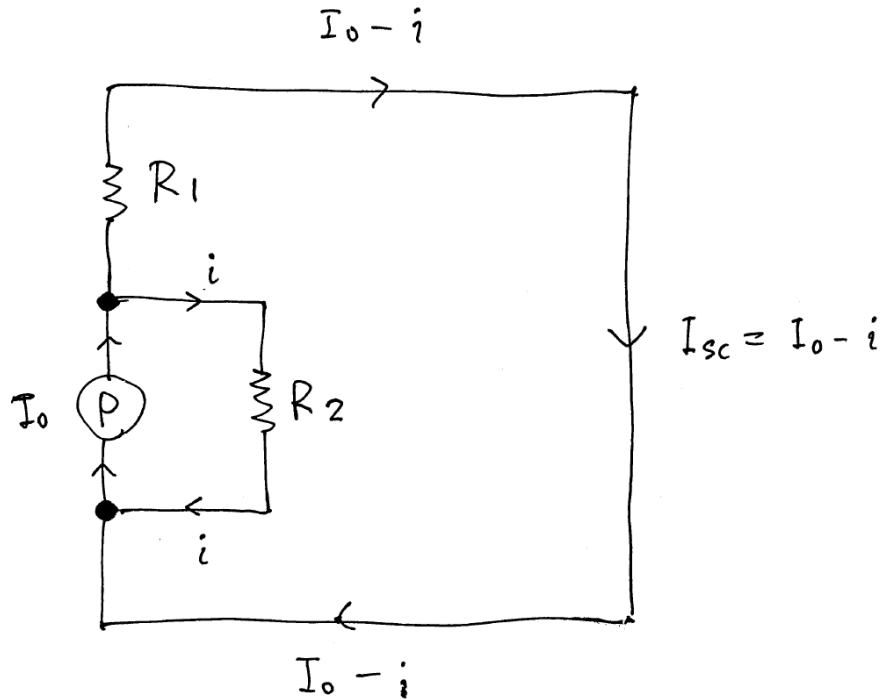


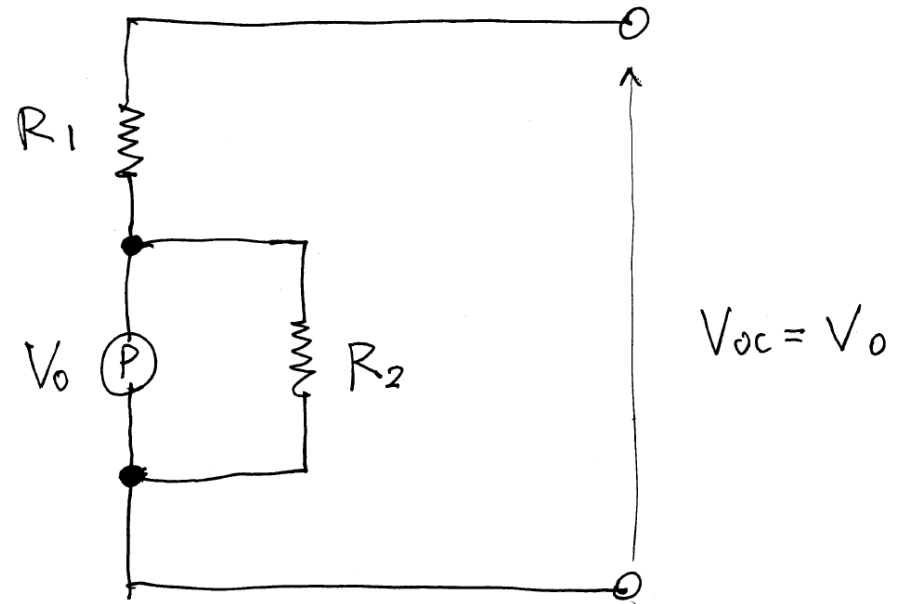
図59  
第三種C型の直流電源のI-V特性

## 第三種C型の直流電源のI-V特性



**図60**  
短絡状態にある第三種C型の直流電源

$$I_{sc} = I_0 - i < I_0 \text{ である。}$$



**図61**  
開放状態にある第三種C型の直流電源

$$V_{oc} = V_0 \text{ である。}$$



### 第三種D型の直流電源のI-V特性

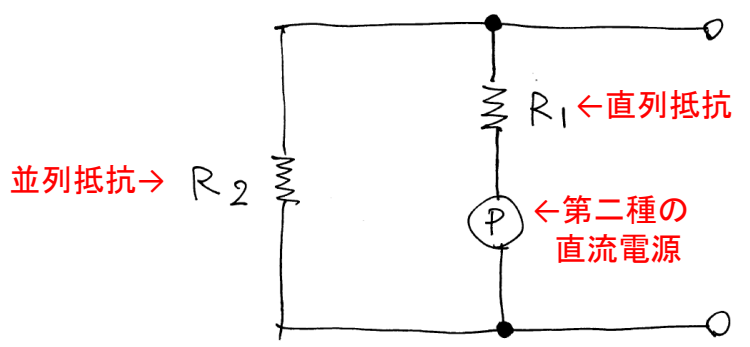


図52  
第三種D型の直流電源の等価回路

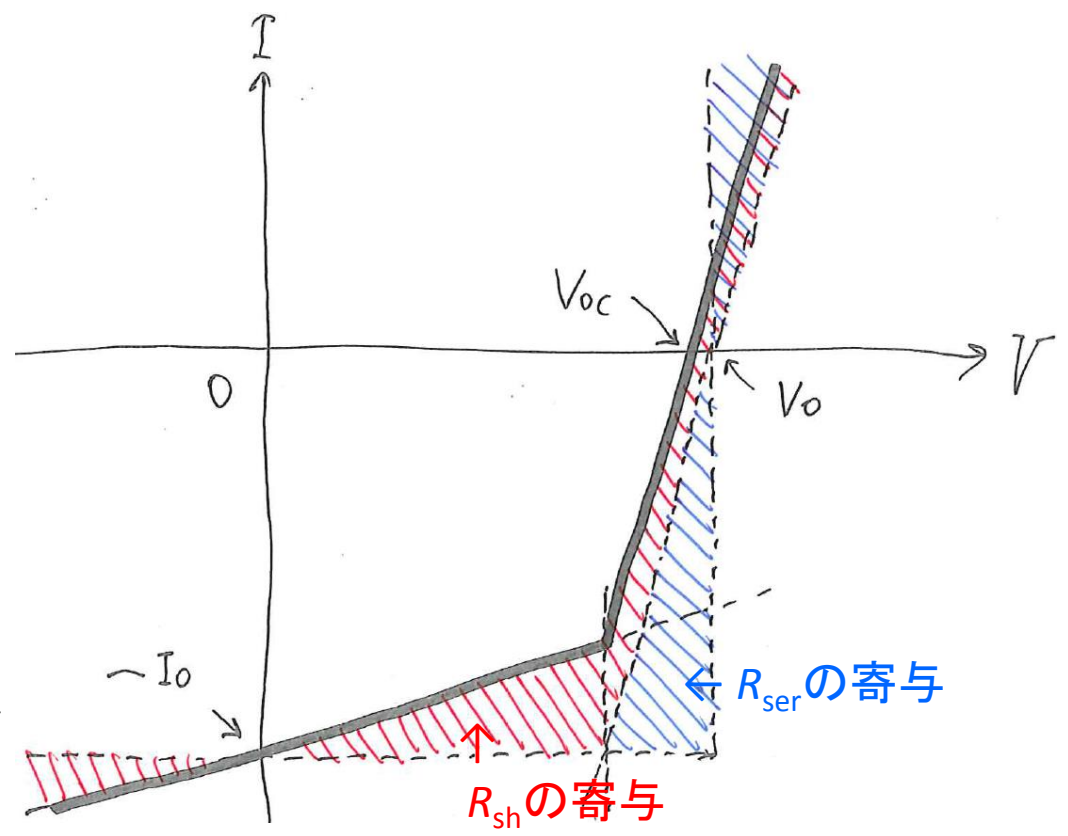
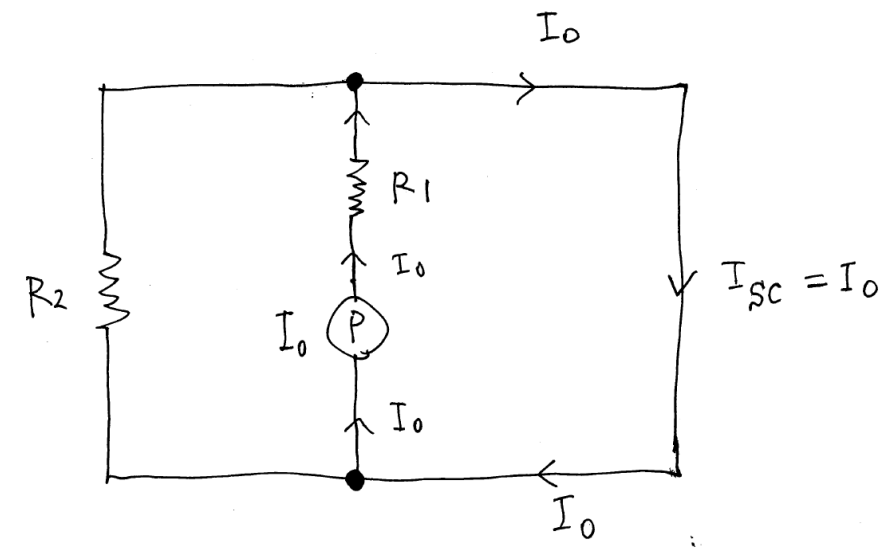
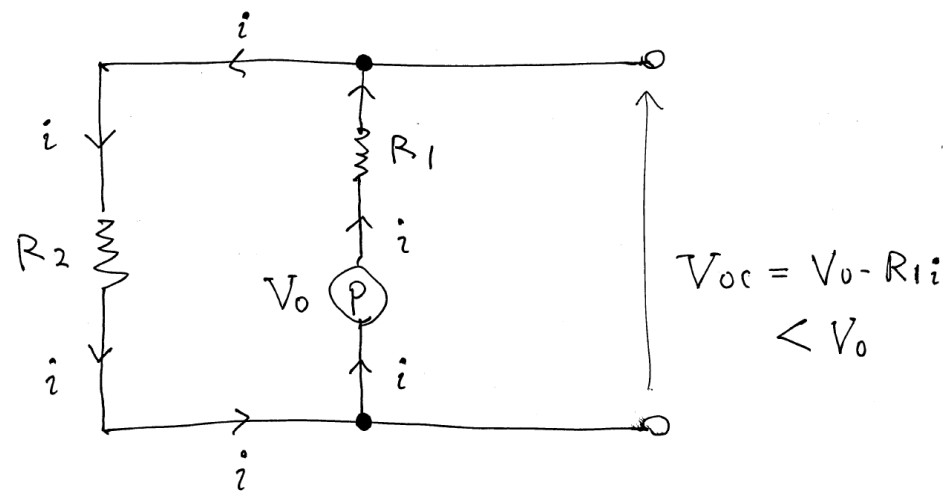


図62  
第三種D型の直流電源のI-V特性

### 第三種D型の直流電源のI-V特性



**図63**  
開放状態にある第三種D型の直  
流電源

**図64**  
短絡状態にある第三種D型の直  
流電源

$V_{OC} = V_0 - R_1 i < V_0$ である。

$I_{SC} = I_0$ である。

太陽電池の本質的な等価回路図は図2であり、また現実的な太陽電池の等価回路図は図1である。

また図51は、図1において図2に相当する部分をⓐで置換した結果になっている。

また、ⓐは $FF = 100\%$ の究極的な太陽電池である。

従って、図51に示された第三種C型の直流電源は、**現実的な太陽電池のモデル**となっている(I-V特性は図59で与えられる)。

従って、太陽電池に対しても、 $V \doteq V_0$ の付近では図55で示されるテブナン等価回路を、また $I \doteq I_0$ の付近では図58で示されるノートン等価回路を与えることが可能である。

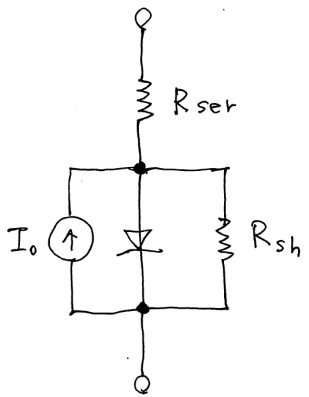


図1

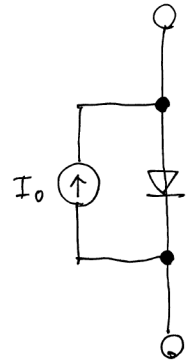


図2

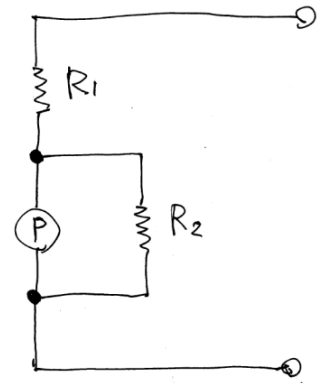


図51

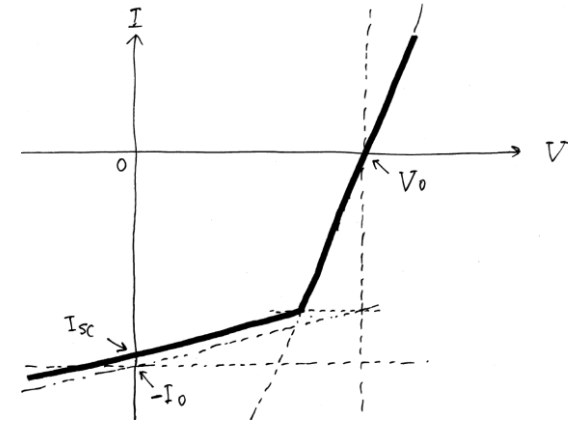


図59

# 第4章 太陽電池のI-V特性

## 素朴なモデルから現実的な等価回路図へ

現実的(非理想的)な太陽電池の等価回路図は図65である(=図1)。

以下においては、ダイオード部分の $I$ - $V$ 特性が図66で模式的に与えられると仮定して、図65で与えられる等価回路の $I$ - $V$ 特性を考察する。

但し、理解を容易にするために、普通は考察しないケースも含めて、段階的に考察を進める。

実際には、図67-1~67-10に示す10種類の場合を考える。

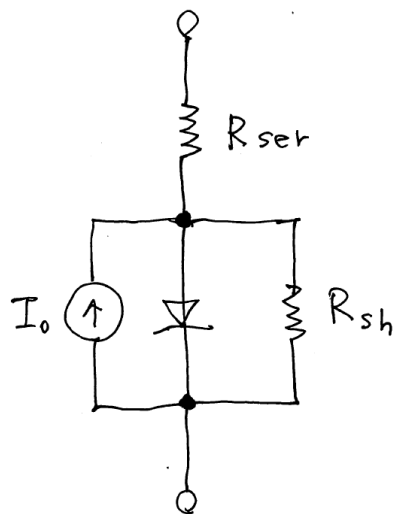


図65  
現実的(非理想的)な太陽電池  
の等価回路図

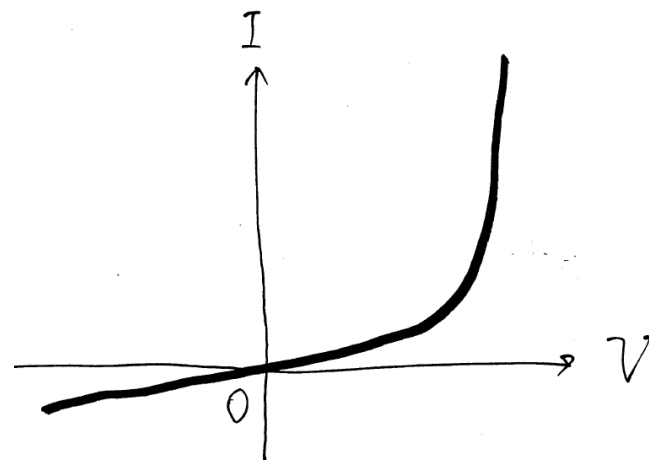


図66  
ダイオード部分の $I$ - $V$ 特性の模式図  
( dark  $I$ - $V$ 曲線)

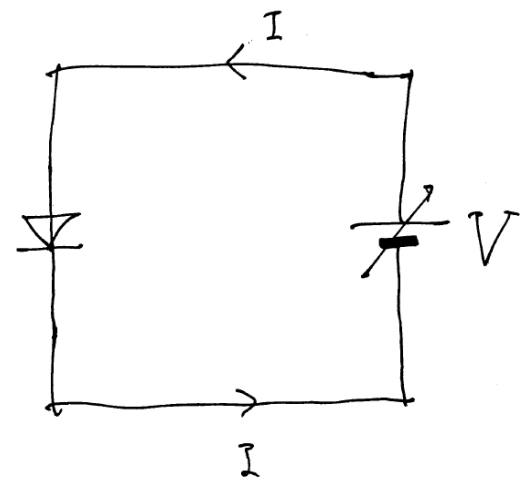


図67-1

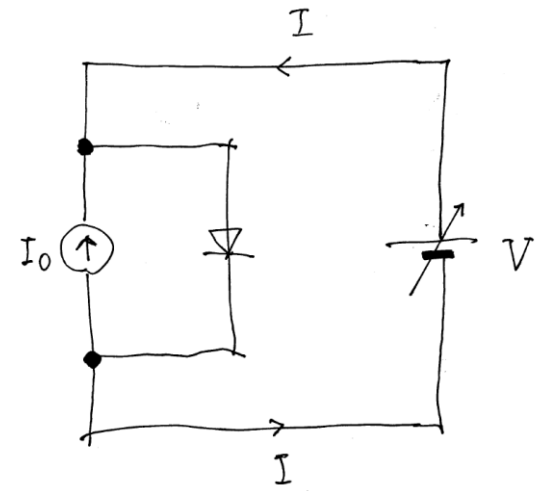


図67-2

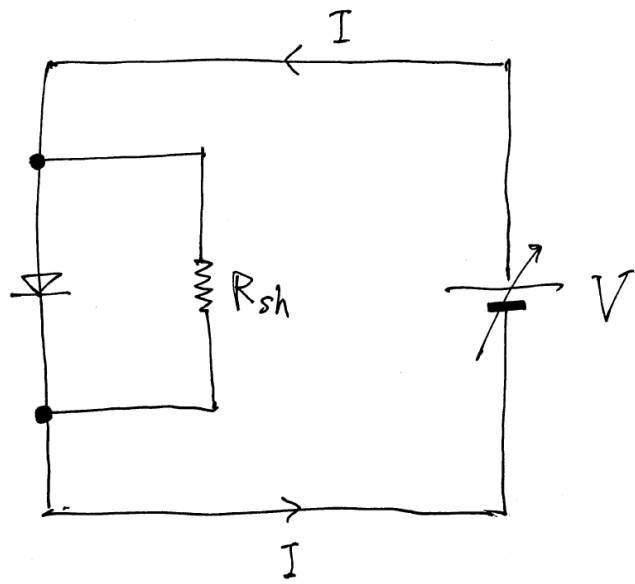


図67-3

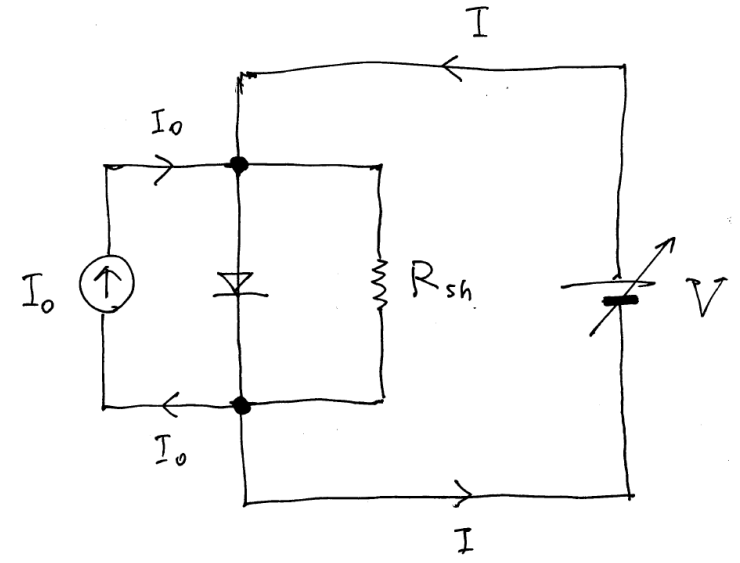


図67-4

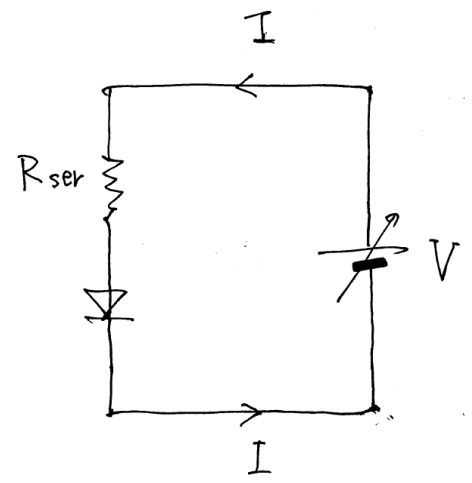


図67-5

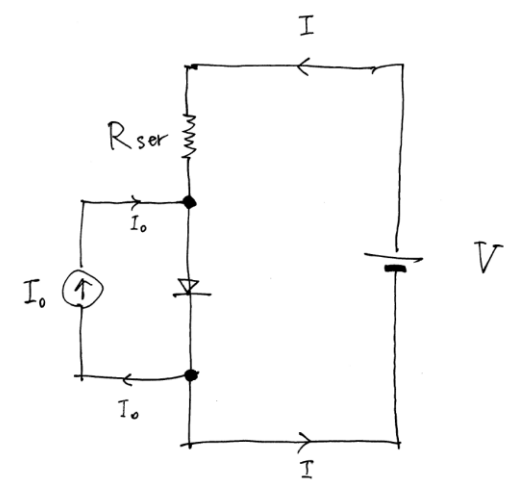


図67-6

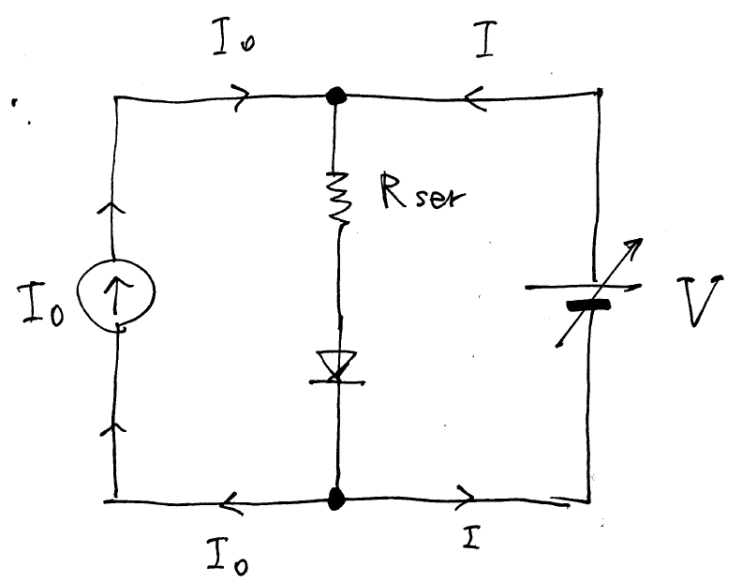


図67-7

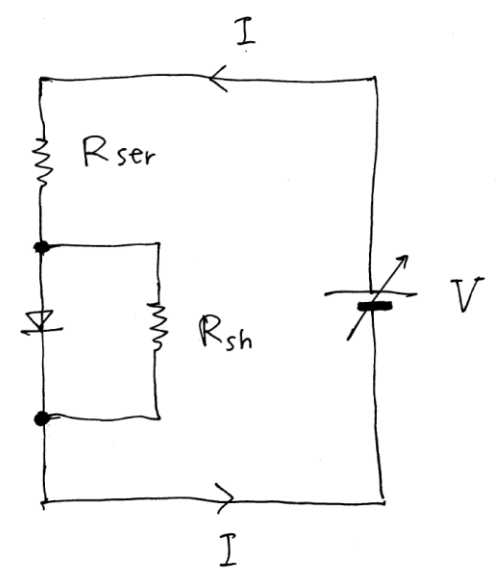


図67-8

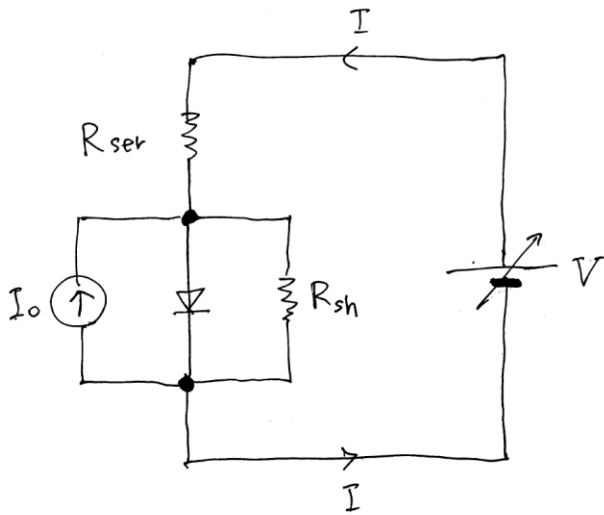


図67-9

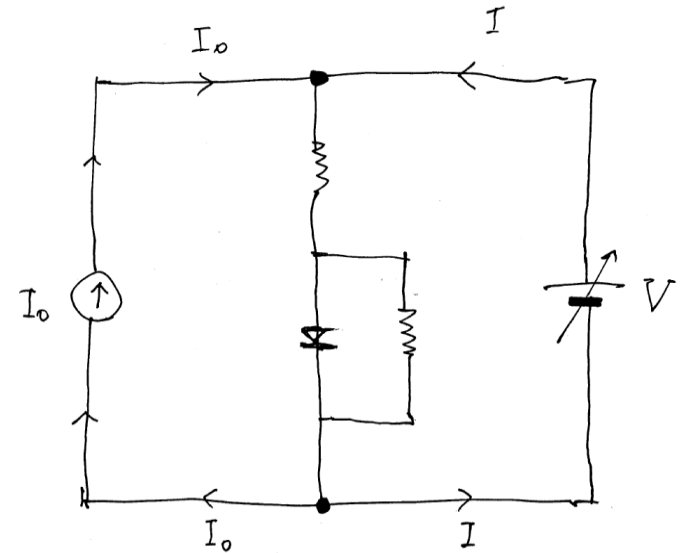


図67-10

図67-1、67-3、67-5、67-8は暗状態を表している。

図67-2、67-4、67-6、67-7、67-9、67-10は、光照射状態を表現している。

表6 図67-1～67-10の等価回路図とそのI-V特性を示した図の番号

回路図	67-1	67-2	67-3	67-4	67-5	67-6	67-7	67-8	67-9	67-10
I-V特性	66	69	71	73	76	78	81A	82	83	86
曲線の番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩



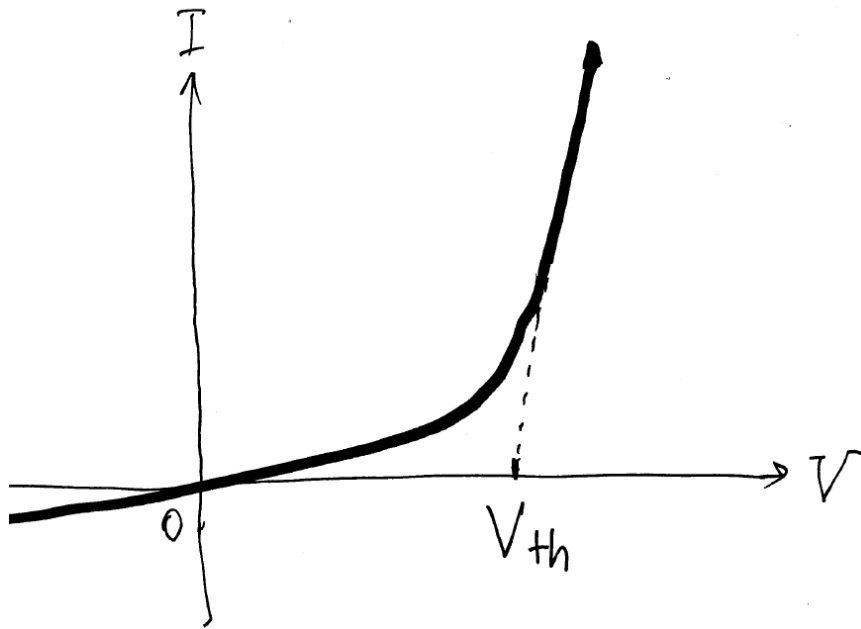


図68  
ダイオードのI-V特性と $V_{th}$

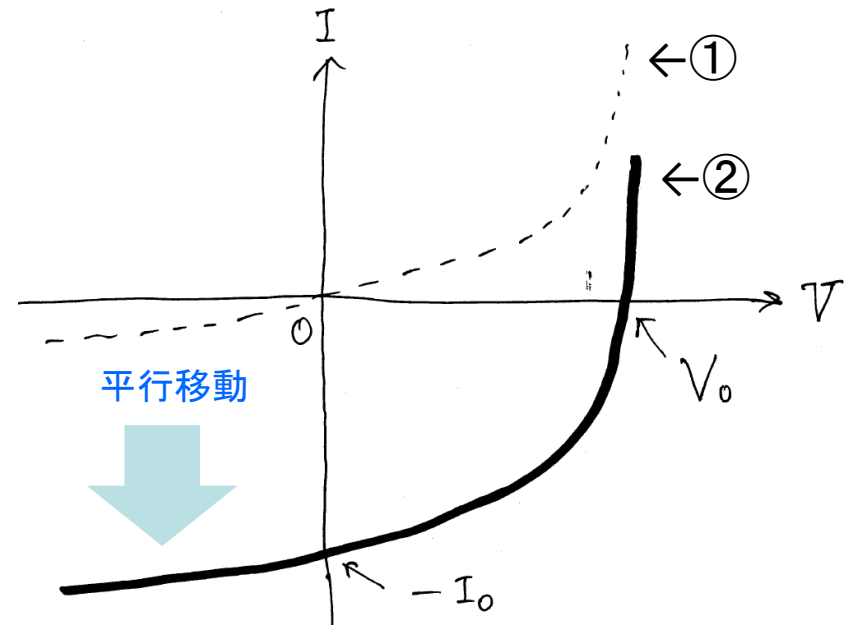


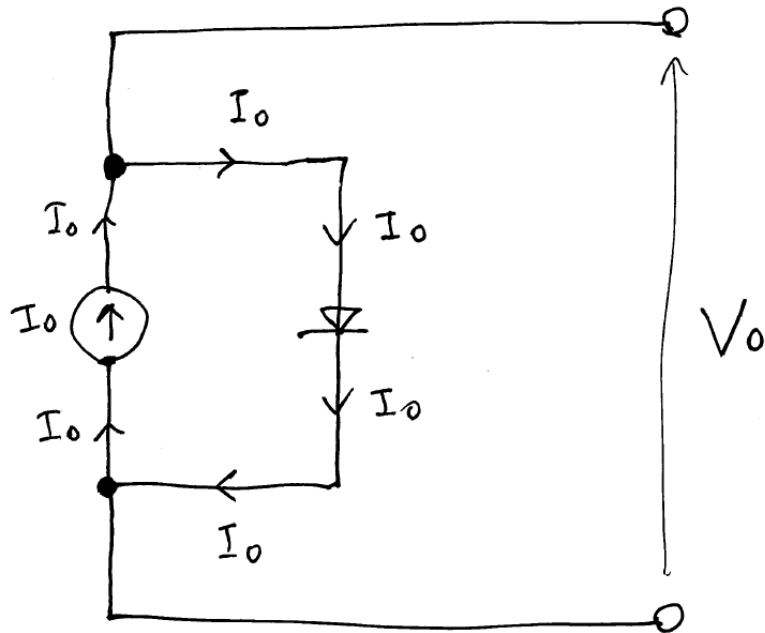
図69  
図67-2のI-V特性 (light I-V曲線) ②

破線①は図66の曲線 (回路図は図67-1)

ダイオードに電流 $I_0$ を (順方向に) 流したときに、ダイオードの両端に発生する電圧を $V_0$ の定義とする。

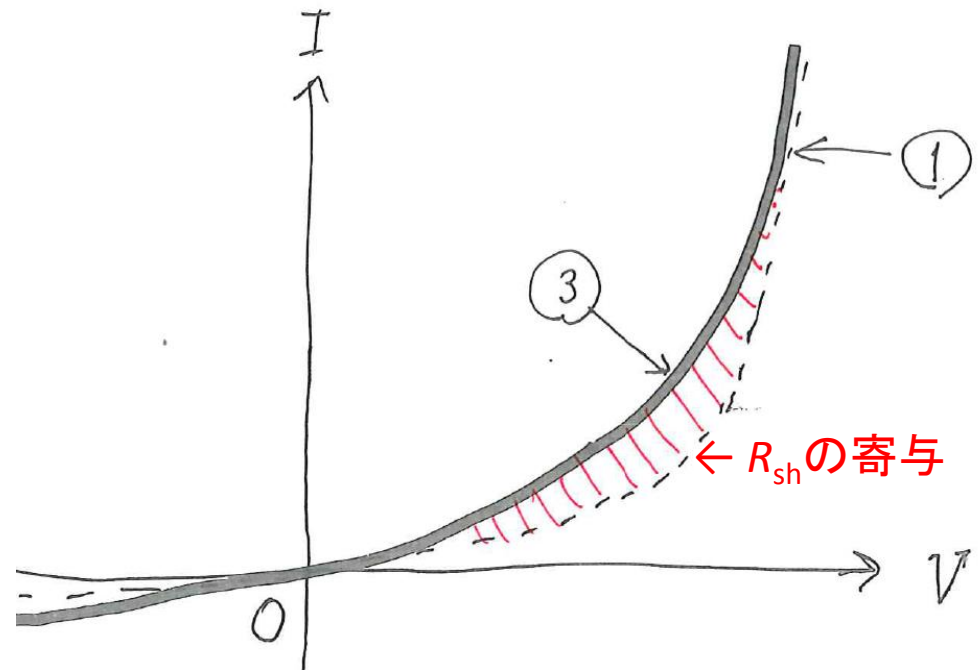
図69の $V_{OC}$ の値 (=  $V_0$ ) は、図68の $V_{th}$ の値と類似しているように見える。

この類似性は必ずしも必然ではないが、実際の多くの太陽電池において経験することである。



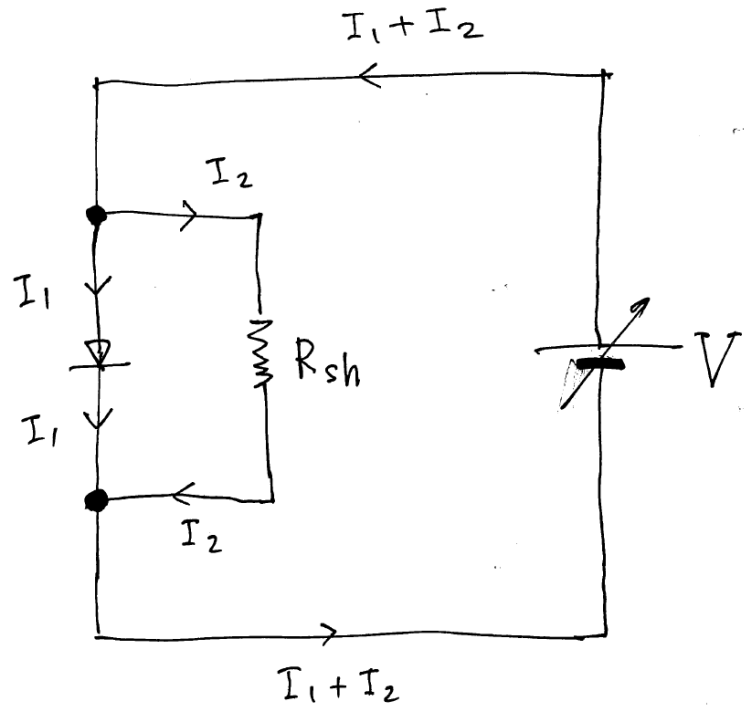
**図70**  
 開放状態にある図67-2の  
 中を流れる電流

ダイオードに電流 $I_0$ が流れるので、  
 $V_{OC} = V_0$ である。



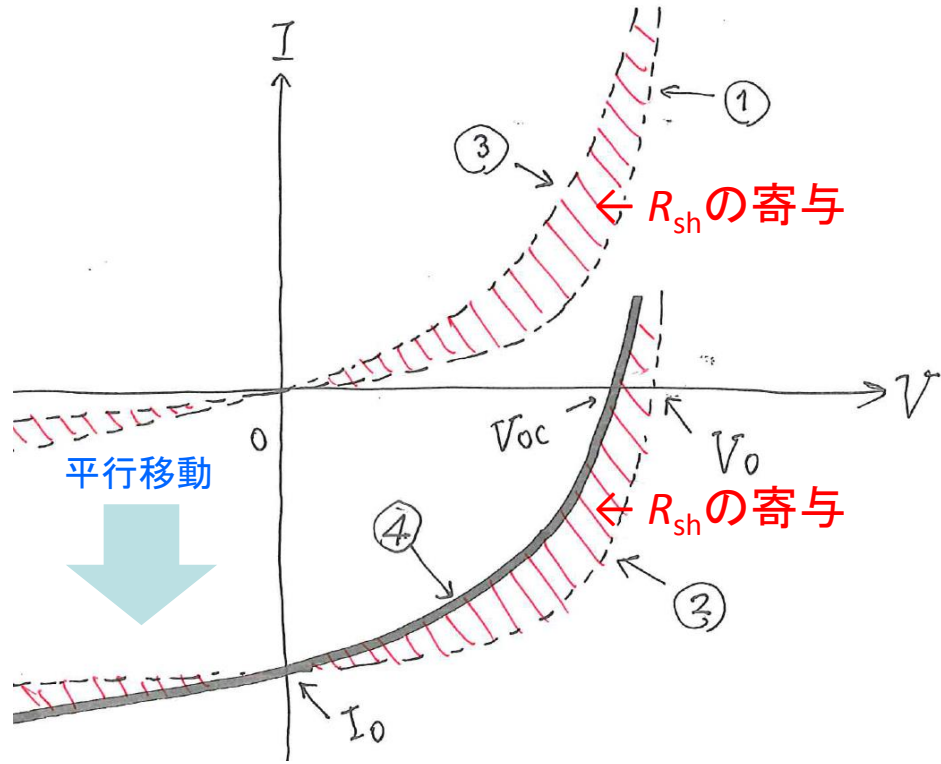
**図71**  
 図67-3の $I$ - $V$ 特性 (dark  $I$ - $V$ 曲線) ③

破線①: 図66の曲線 (回路図は図67-1)



**図72**  
 $V > 0$ 状態にある図67-2の  
 中を流れる電流

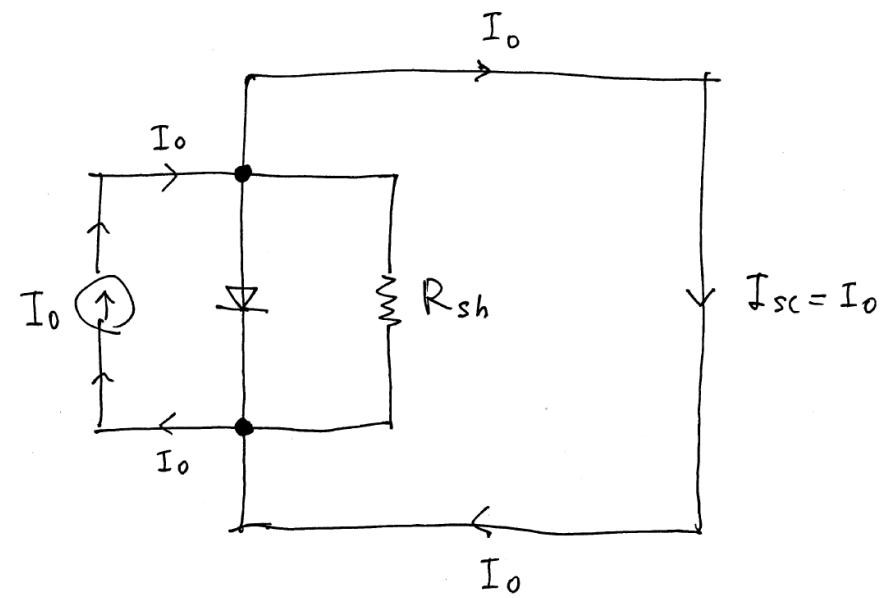
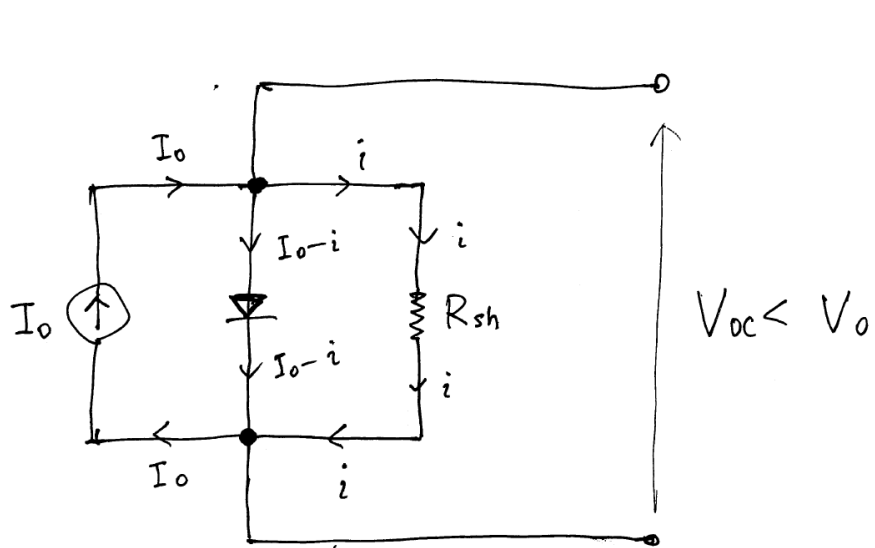
電流の一部が  $R_{sh}$  を通過して  
 流れる。



**図73**  
 図67-4のI-V特性 ( light I-V曲線) ④

- 破線①: 図66の曲線 (回路図は図67-1)
- 破線②: 図69の曲線 (回路図は図67-2)
- 破線③: 図71の曲線 (回路図は図67-3)

図73の曲線は、図71の曲線を、縦軸に平行に  $I_0$  だけ下方に平行移動したに過ぎない。



**図74**  
開放状態にある図67-4の中を流れる電流

**図75**  
短絡状態にある図67-4の中を流れる電流

$R_{sh}$ を通過して流れる電流があるので  $V_{OC} < V_0$ となる。

$I_{SC} = I_0$

- ★  $R_{sh}$  (並列抵抗) の挿入が系の  $V_{OC}$  を低下させる現象は、非常に普遍的な現象である。
- ★  $R_{sh}$  (並列抵抗) の挿入は系の  $FF$  も低下させる。

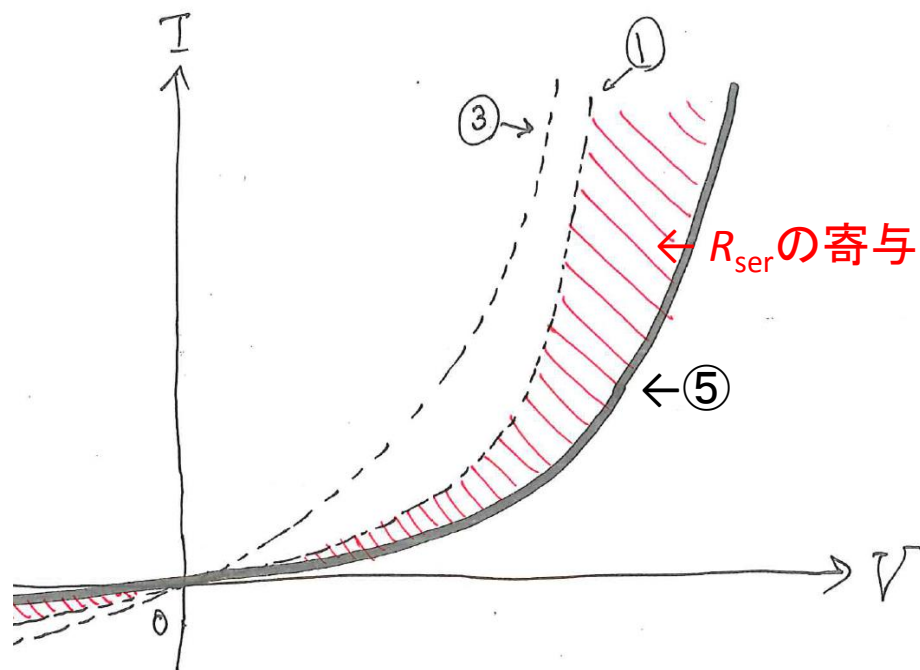


図76

図67-5のI-V特性 (dark I-V曲線) ⑤

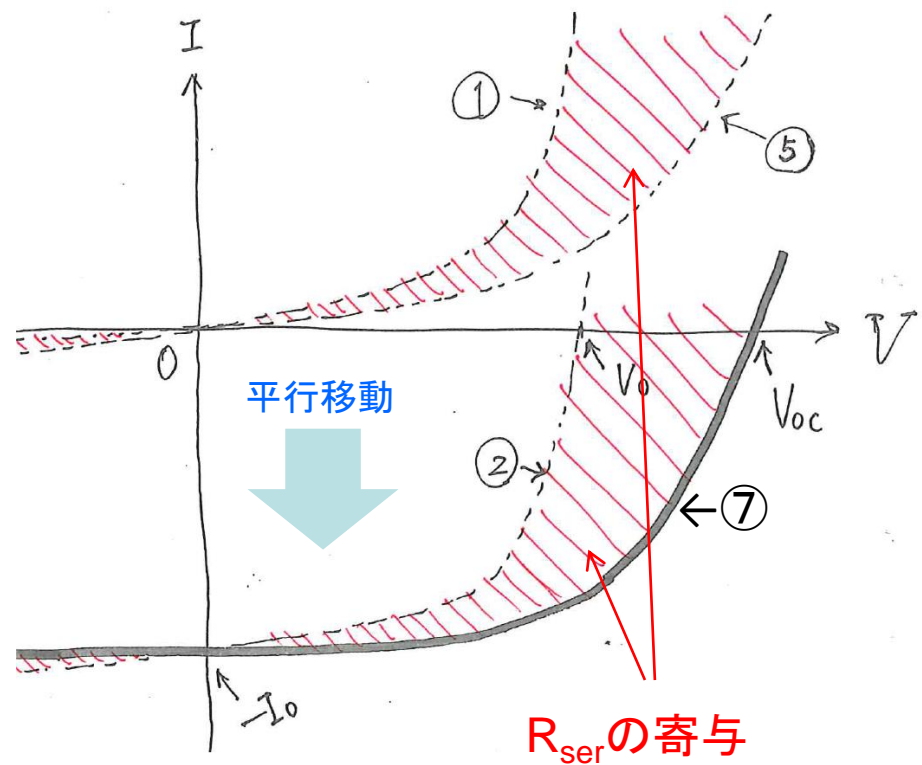
破線①: 図66の曲線 (回路図は図67-1)

破線③: 図71の曲線 (回路図は図67-3)

$V > 0$ で 曲線の左右の位置関係が、破線① < 実線 であることから、暗状態のI-V特性がこのような曲線となった場合に、その太陽電池の $V_{OC}$ が $V_0$ 以上の大きな値を示す (従って図67-2の太陽電池よりも高い変換効率を示す) という期待を持つかも知れないが、それは誤りである。

なぜならば、もしこの $R_{ser}$ が直列抵抗ならば、光照射時の等価回路図は図67-6のようになるが、後述するように、そのI-V特性は図78のようになり、 $V_{OC}$ の値は $V_0$ から全く変化しない (増大しない) からである。

それどころか、図78のI-V特性は図69のI-V特性と比較して、明らかにFFが低下しているだけでなく、 $I_{SC}$ の値も少し低下しており、従ってその太陽電池の変換効率は図67-2の太陽電池よりも低くなる。



**図77**  
**図76の曲線(実線)を縦軸に平行に**  
 **$I_0$ だけ下方に平行移動した曲線⑦**

- 破線①: 図66の曲線(回路図は図67-1)
- 破線②: 図69の曲線(回路図は図67-2)
- 破線⑤: 図76の曲線(回路図は図67-6)

$V_{OC} > V_0$ となる。

図76の結果を見て  $V_{OC} > V_0$  になると期待する理由は、光照射下の  $I$ - $V$  特性は、図76の曲線⑤(実線)を縦軸に平行に  $I_0$  だけ下方に平行移動したものになる、と想定するからである。

その場合は確かに  $V_{OC} > V_0$  になることが期待される。

実際に、図76の曲線⑤(実線)を縦軸に平行に  $I_0$  だけ下方に平行移動した曲線を図77⑦に示すが、確かに  $V_{OC} > V_0$  になる。

しかしながら、この図67-7のような等価回路で理解しなければならないデバイスは、これまでに見た経験が無い。

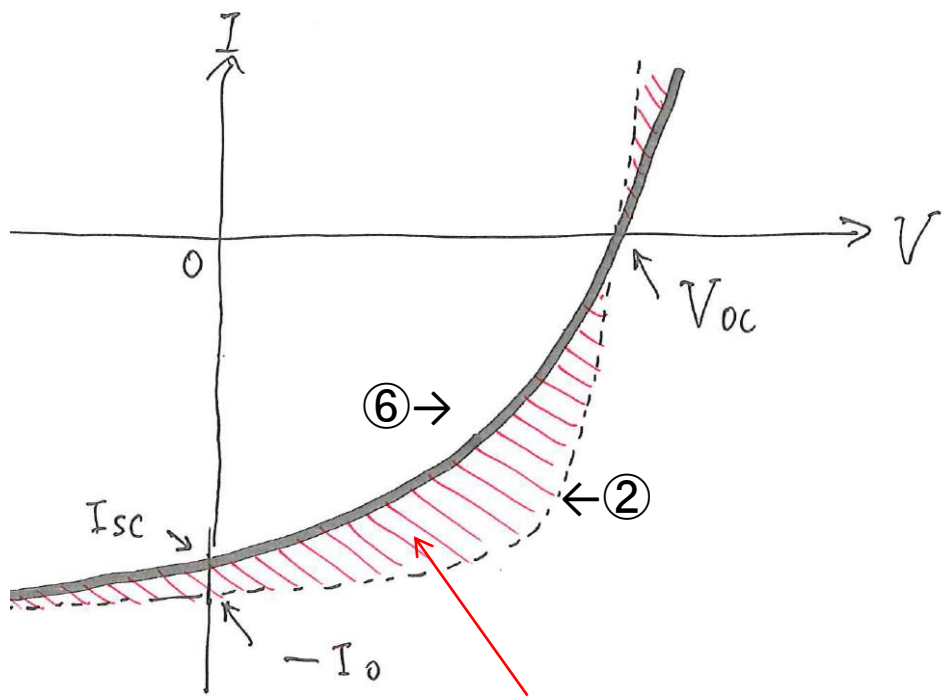


図78  
図67-6のI-V特性 (light I-V曲線) ⑥

破線②: 図69の曲線 (回路図は図67-2)

$R_{ser}$ の寄与

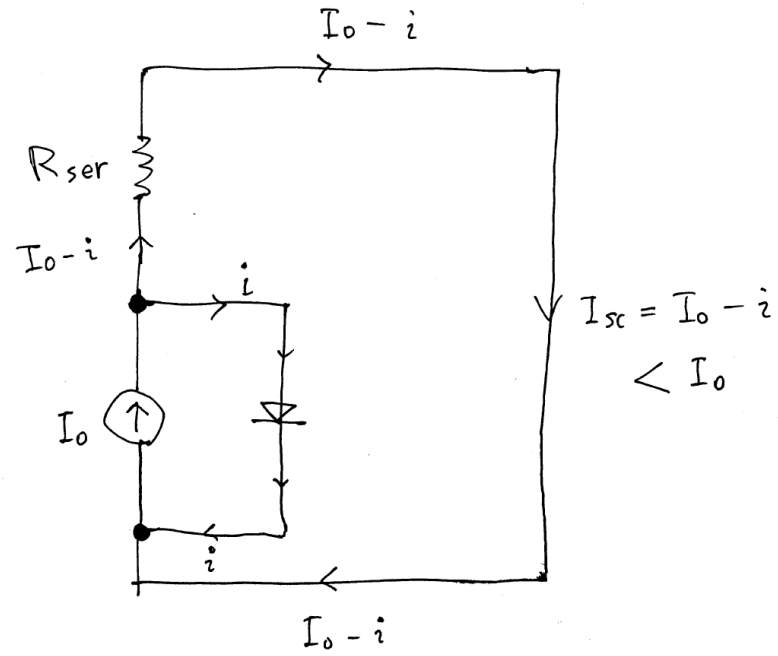
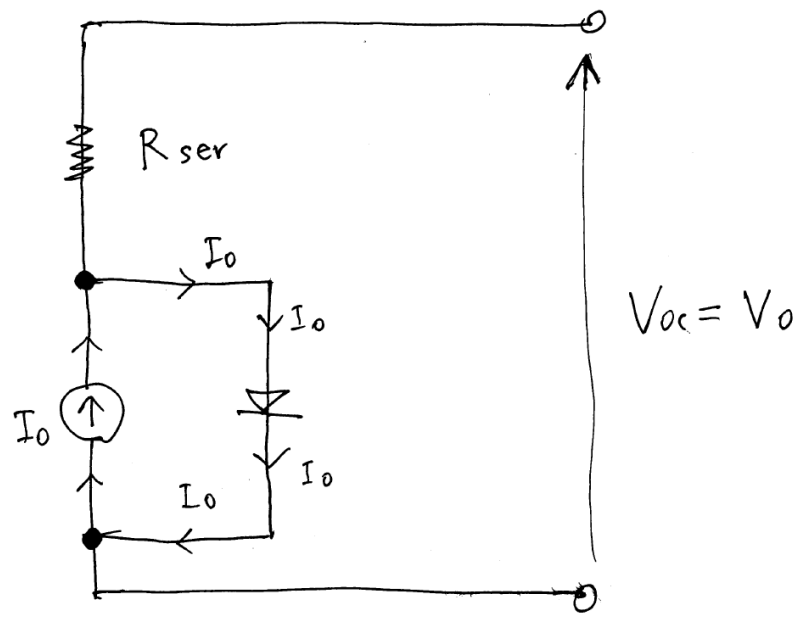


図79  
短絡状態にある図67-6の中を流れる電流

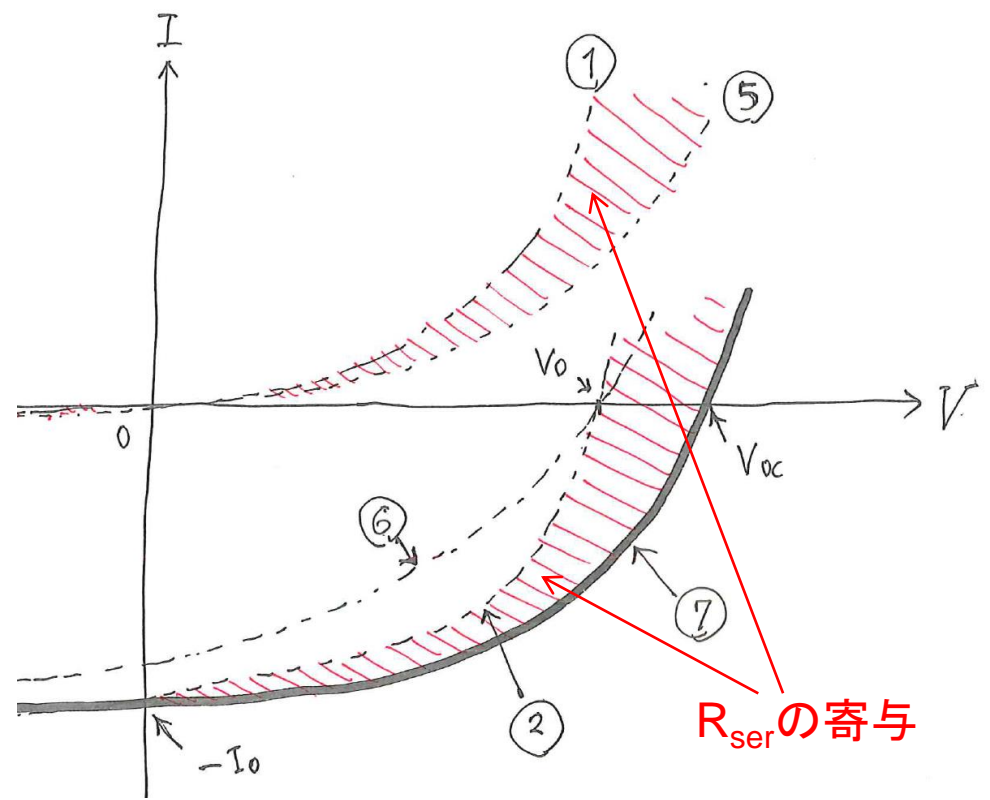
ダイオード部分は有限の電気伝導度を持つので、 $R_{ser} \neq 0$ の場合は(↑)で発生した電流の一部がダイオードを通過して逆流する  $\Rightarrow I_{sc} = I_0 - i < I_0$

★  $R_{ser}$  (直列抵抗) の挿入が系の  $I_{sc}$  を低下させる現象は、非常に普遍的な現象である。



**図80**  
開放状態にある図67-6の中を流れる電流

(↑)で発生した電流の全て(=  $I_0$ )がダイオードを通過して逆流する  
 $\Rightarrow V_{oc} = V_0$

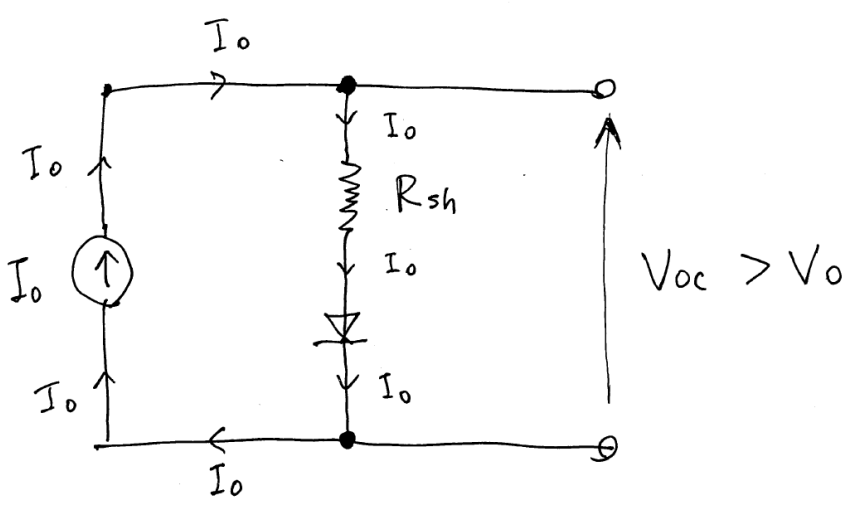


**図81A**  
図67-7のI-V特性 (light I-V曲線) ⑦

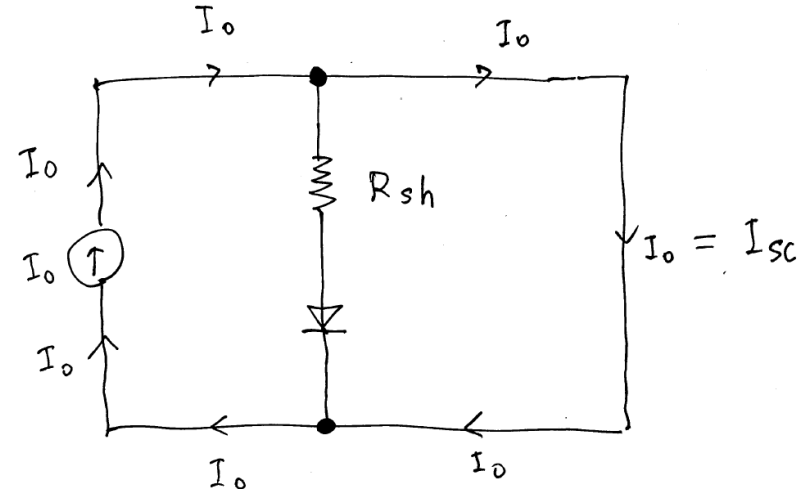
- 破線①: 図66の曲線 (回路図は図67-1)
- 破線②: 図69の曲線 (回路図は図67-2)
- 破線⑤: 図76の曲線 (回路図は図67-5)
- 破線⑥: 図78の曲線 (回路図は図67-6)

★  $R_{ser}$  (直列抵抗) の挿入は系のFFも低下させる。





**図81B**  
開放状態にある図67-7の中を  
流れる電流



**図81C**  
短絡状態にある図67-7の中を  
流れる電流

図67-2と比較すると図67-7は $R_{ser}$ が追加されているために、図67-7の  $V_{OC}$  は  $V_0 + R_{ser}I_0$  となり、 $V_{OC} > V_0$  となる。

DUT1 + DUT2が外部で短絡されているならば、DUT2(↑)が発生する電流の全てが、その短絡された部分を通るので  $I_{SC} = I_0$  となる。

この図67-7のような等価回路で理解しなければならないデバイスは、これまでに見た経験が無い。

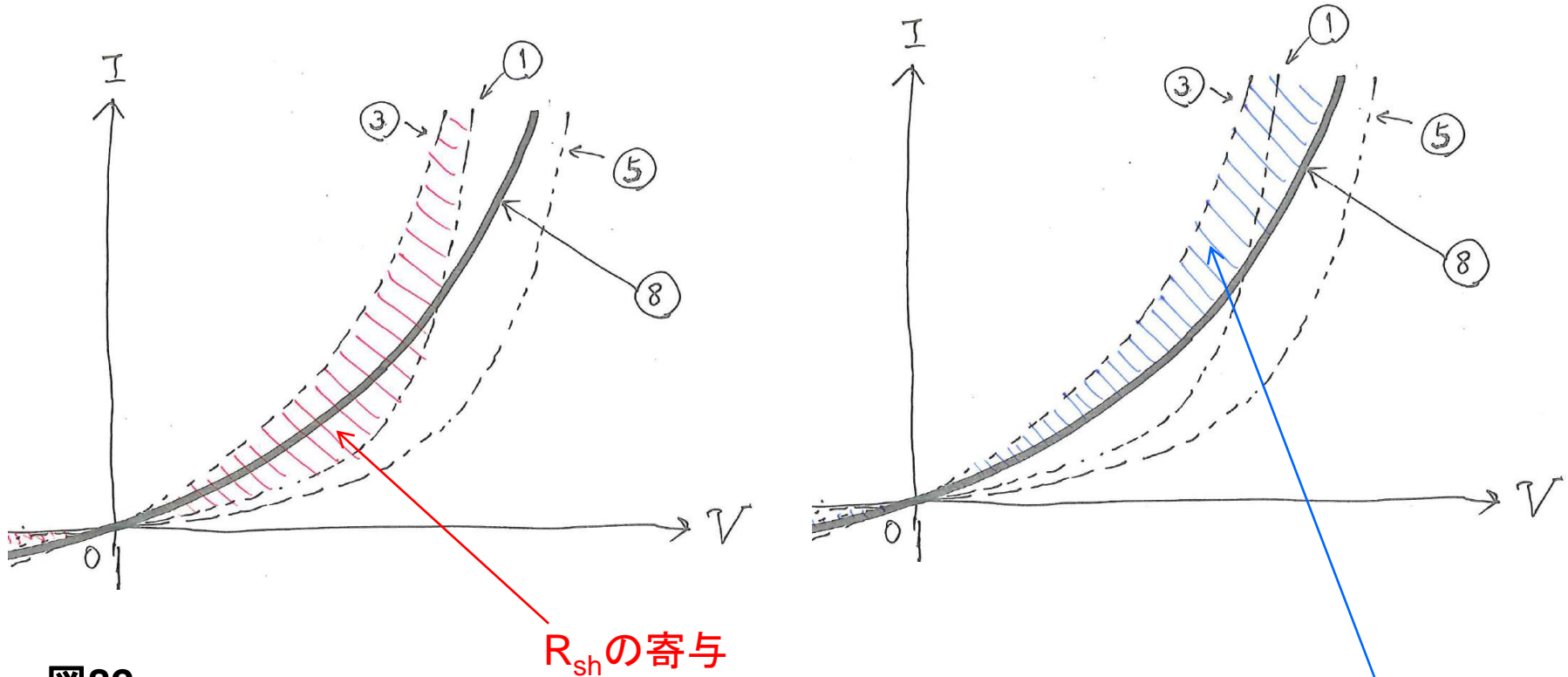


図82

図67-8のI-V特性 (dark I-V曲線) ⑧

破線①: 図66の曲線

破線③: 図71の曲線

破線⑤: 図76の曲線

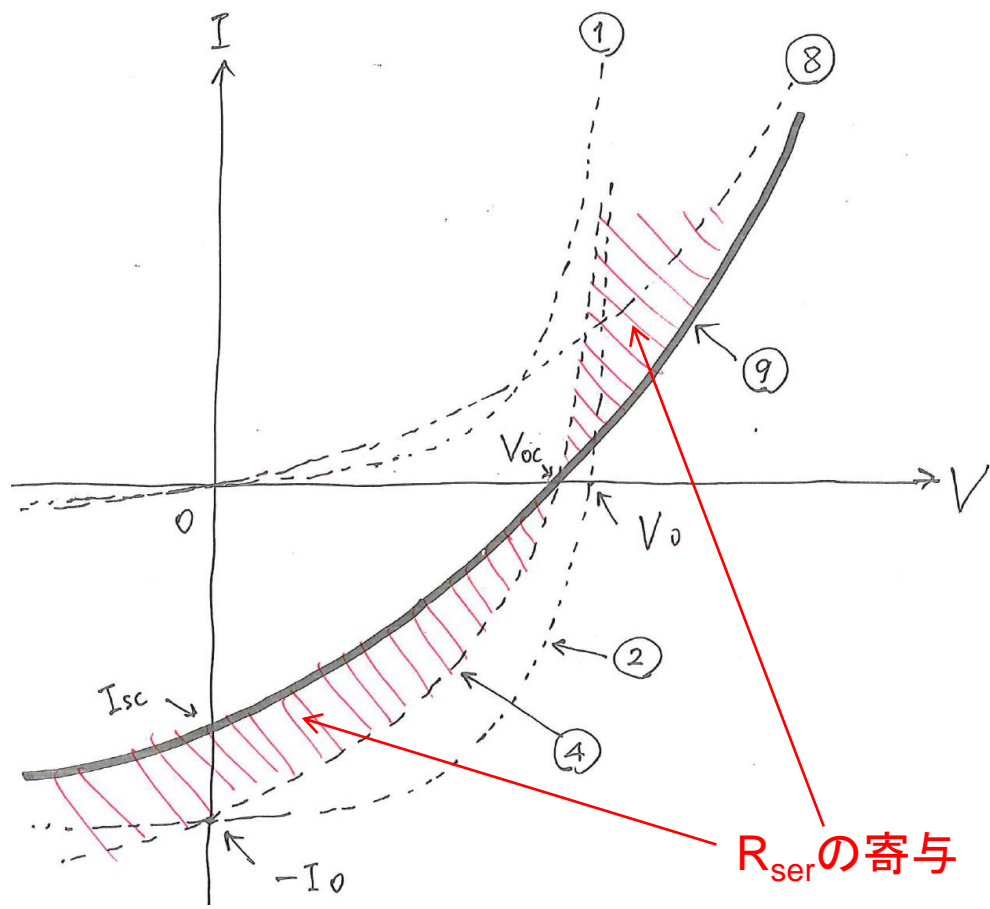
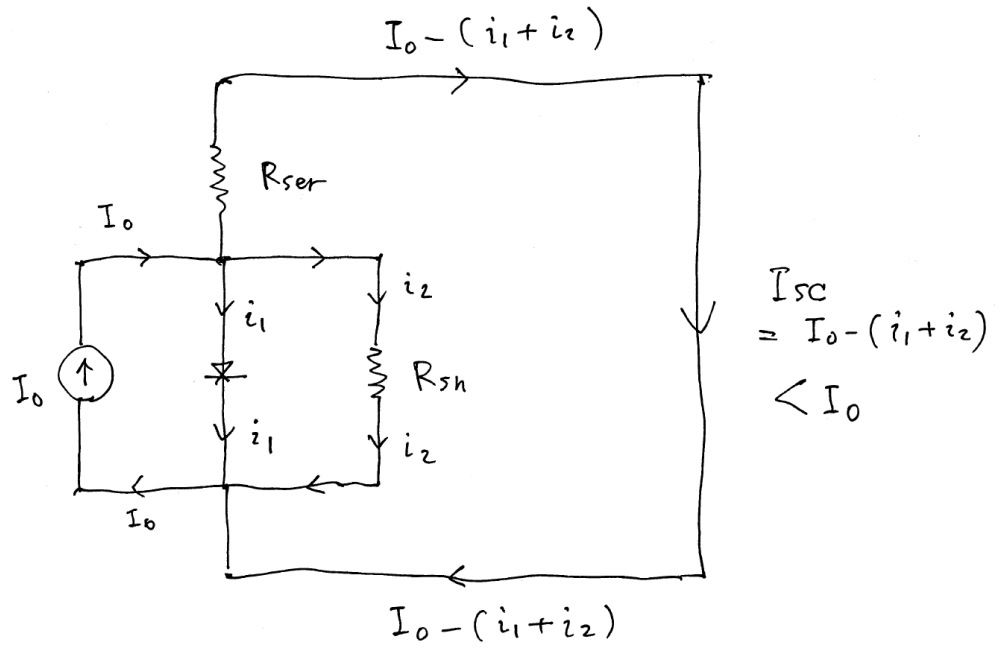
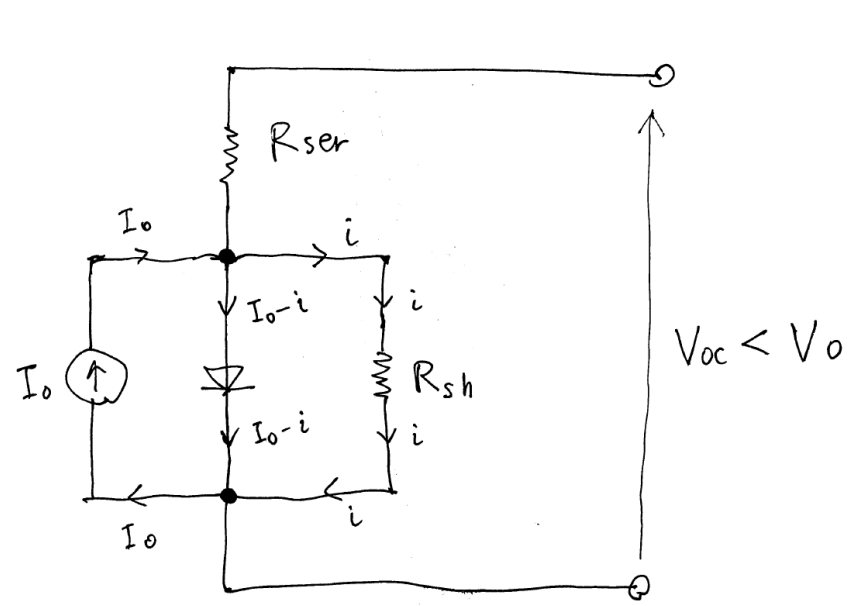


図83  
図67-9のI-V特性 (light I-V曲線) ⑨

- 破線①: 図66の曲線 (回路図は図67-1)
- 破線②: 図69の曲線 (回路図は図67-2)
- 破線④: 図73の曲線 (回路図は図67-4)
- 破線⑧: 図82の曲線 (回路図は図67-8)

**$R_{ser}$ の挿入が $I_{sc} < I_0$ を引き起こし、 $R_{sh}$ の挿入が $V_{oc} < V_0$ を引き起こす。**  
**★ 図67-9は、単一接合を持つ単独の太陽電池の、最も一般的な等価回路である。**



**図84A**  
開放状態にある図67-9の中を  
流れる電流

**図84B**  
短絡状態にある図67-9の中を  
流れる電流

開放状態においては、 $R_{sh} \neq \infty$  の場合は(↑)で発生した電流(=  $I_0$ )の一部(図84Aでは電流  $i$ )が  $R_{sh}$  を通過して逆流するので、ダイオードを流れる電流は  $I_0 - i < I_0$  となり、従ってダイオードの両端に発生する電圧  $V$  は  $V < V_0$  となる。

短絡状態においては、 $R_{ser} \neq 0$  の場合は(↑)で発生した電流(=  $I_0$ )の一部(図84Bでは電流  $i_1$  と  $i_2$ )がダイオードと  $R_{sh}$  を通過して逆流するので  $I_{sc} < I_0$  となる。

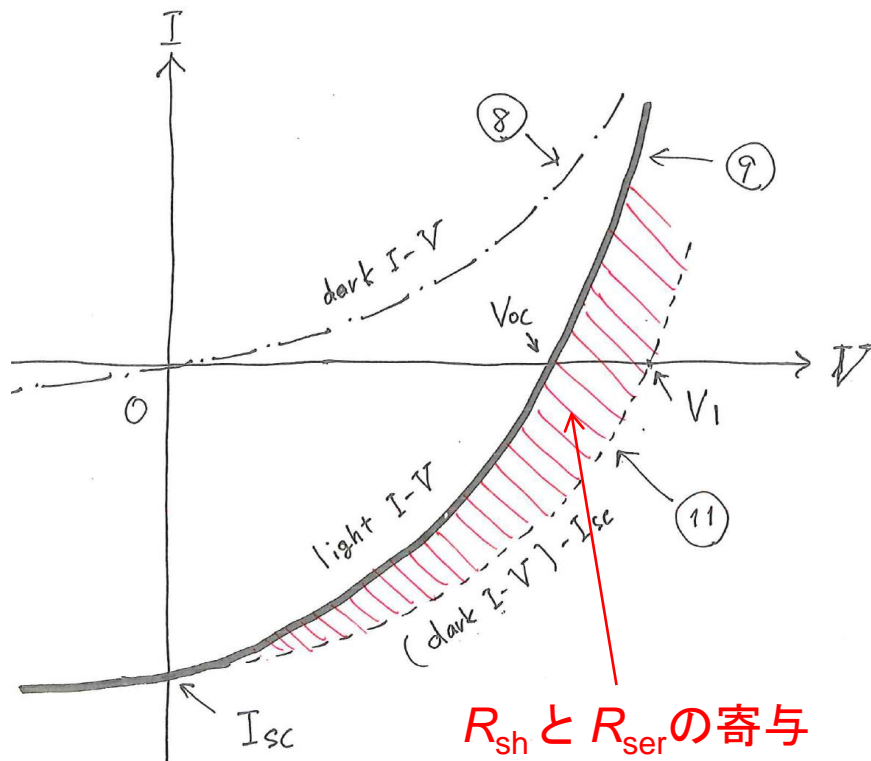


図85  
図67-9のlight I-V曲線と(dark I-V) - I<sub>sc</sub>曲線を比較した結果

- 実線⑨: light I-V曲線 = 図83の曲線
- 破線⑪: (dark I-V) - I<sub>sc</sub>曲線
- 鎖線⑧: 図82の曲線

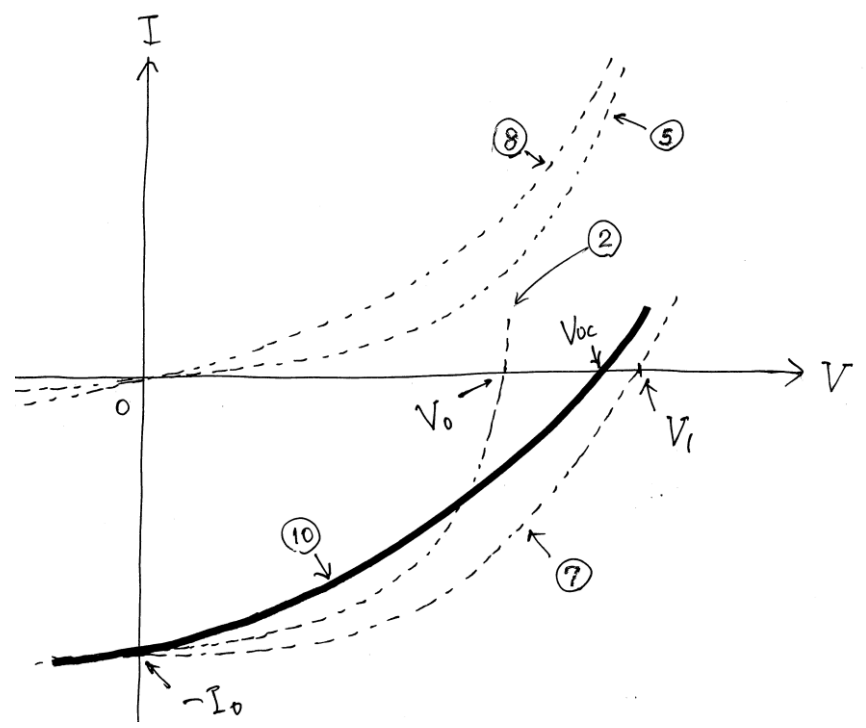
dark I-V 曲線を縦軸に平行に I<sub>sc</sub> の値だけ下方に平行移動した曲線を考えて、これを仮に (dark I-V) - I<sub>sc</sub> 曲線と呼ぶ。

V > 0 の領域では、light I-V 曲線と (dark I-V) - I<sub>sc</sub> 曲線の位置を比較すると、必ず前者は後者の内側に入り込み、その結果として必ず  $V_{oc} < V_1$  となる。

また、light I-V 曲線の形状因子を  $FF_0$  とおき、(dark I-V) - I<sub>sc</sub> 曲線の形状因子を  $FF_1$  とおくならば、普通は  $FF_0 < FF_1$  である。

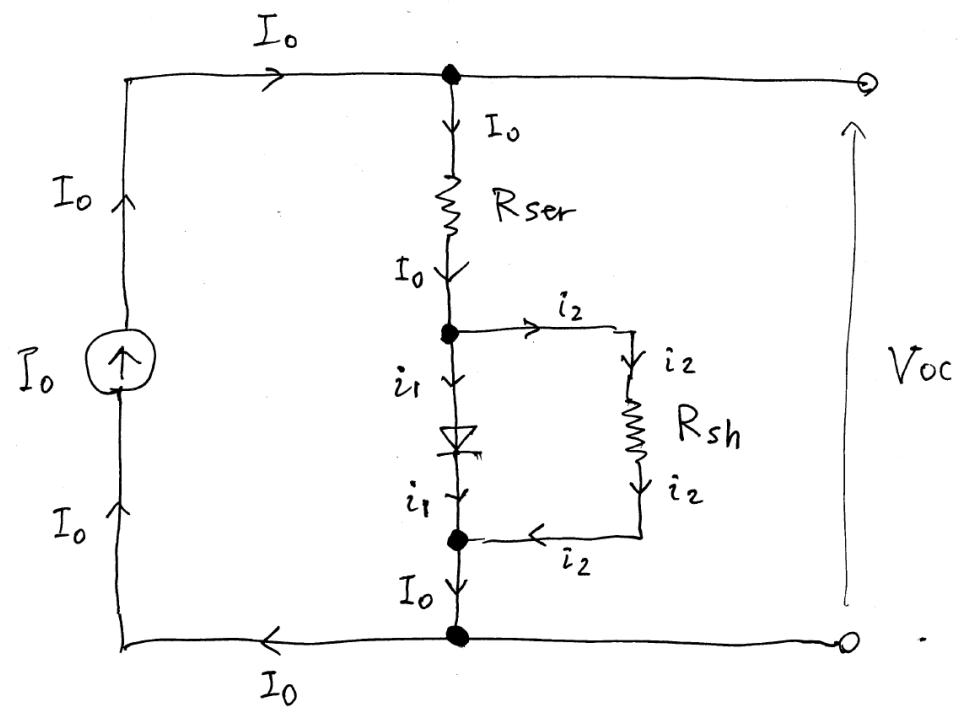
そして図85では、 $V_{oc} < V_1$  や  $FF_0 < FF_1$  となる原因は、専ら  $R_{sh}$  と  $R_{ser}$  の存在である。

なお、 $V_{oc} < V_0$  や  $FF_0 < FF_1$  となる現象は、多くの太陽電池において頻繁にみられる。その要因は様々であり、 $R_{sh}$  と  $R_{ser}$  の他に、キャリア再結合の光強度依存性が要因である場合も多い。



**図86**  
**図67-10のI-V特性 (light I-V曲線)**

- 破線②: 図69の曲線 (回路図は図67-2)
- 破線⑤: 図76の曲線 (回路図は図67-5)
- 破線⑧: 図82の曲線 (回路図は図67-8)
- 破線⑦: 図81Aの曲線 (回路図は図67-7)



**図87**  
**開放状態にある図67-10の中を流れる電流**

$V_{OC} < V_1$ となる理由は、 $R_{sh} \neq \infty$ の場合はダイオードと $R_{sh}$ を並列接続した要素の電気抵抗が、単体のダイオードの電気抵抗よりも低くなるためである。  
 $V_{OC} > V_0$ となる理由は $R_{ser} \neq 0$ の影響が大きく作用しているためである。

# 第5章 $pn$ 接合理論の基礎と $I$ - $V$ 特性

## 素朴な $pn$ 接合理論の帰結

標準的な理論では、pn接合のI-V特性を表現する数式は次式で与えられる。

$$I = I_S \left\{ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad \text{①}$$

ここで、 $I_S$  は逆方向飽和電流と呼ばれるパラメータである。

**この $I_S$ の値を支配している主な要因は、電子・正孔の再結合である。**

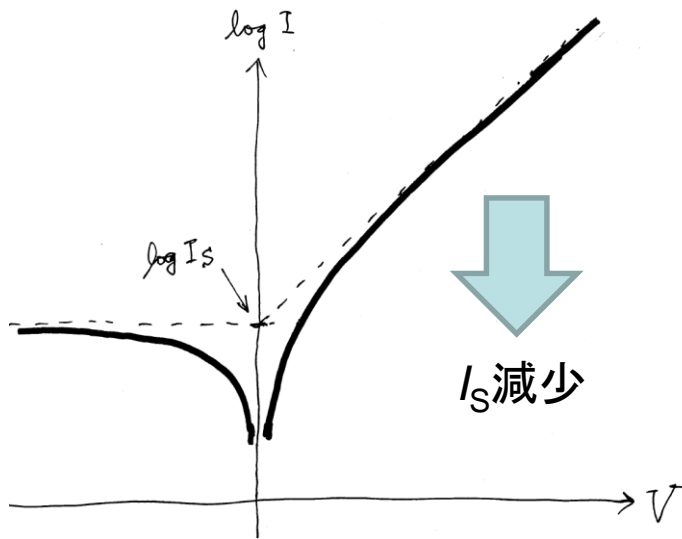


図88

①式で与えられるI-V特性

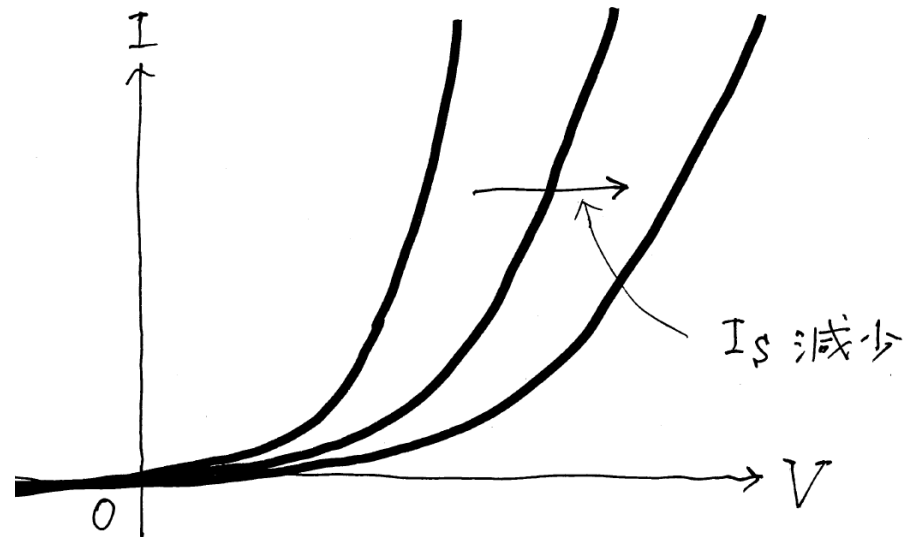


図89

①式で与えられるI-V特性の $I_S$ 依存性



図89を見ると $I_S$ の値が減少するに従って、 $V_{th}$ の値は増大しているように見える。

しかしながら①式には特別な $V_{th}$ の値は存在しない。

それは、図88を見ても自明であり、 $I$ - $V$ 特性の曲線が急激に立ち上がるような、ある特性的な電圧 $V_{th}$ は存在しない。

実際のところ、①式から②式を得る。

$$\frac{I}{I_S} = \left\{ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad \text{②}$$

②式の右辺は $I_S$ に全く依存しない式である。

これは $I_S$ の値が様々に異なる場合でも、**グラフの縦軸のスケールを適当に調節することにより、全てのグラフを同一の曲線にすることが出来る**ことを意味している。それならば、個々の $I_S$ の値に依存して変化するような、特別な $V_{th}$ の値があるはずはない。

実際に観察される $I$ - $V$ 特性においては、 $V_{th}$ の存在を認識できる場合が多い。その理由の詳細は不明であるが、たぶん $R_{sh}$ の**存在**であると考えられる。

ダイオード部分のI-V特性が①式で与えられるならば、図67-2のI-V特性は次式で与えられる。

$$I = I_S \left\{ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right\} - I_0 \quad \text{③}$$

図69の開放電圧である $V_0$ の値は、③式において左辺=ゼロとおいた式をVについて解くことにより、次式で与えられる。

$$V_0 = \left(\frac{k_B T}{e}\right) \ln \left\{ \left(\frac{I_0}{I_S}\right) + 1 \right\} \quad \text{④}$$

従って、 $V_0$ の値は $I_S$ の値に大きく依存しており、 $I_S$ の値が増大するに従って $V_0$ の値は低下する。

従って、 $I_S$ の値が増大すると $V_{oc}$ の値は低下する、という一般的な傾向がある。

そのような傾向は、図89を見ても見てとれる。

①式は理想的なpn接合のI-V特性を与える表式である。  
現実的な(非理想的な)pn接合のI-V特性は、①式に様々な修正を施すことによって与えられるが、最も重要な補正は、⑤式のように**電圧Vの前に係数1/nを挿入**することである。

$$I = I_S \left\{ \exp \left( \frac{eV}{nk_B T} \right) - 1 \right\} \quad \text{⑤}$$

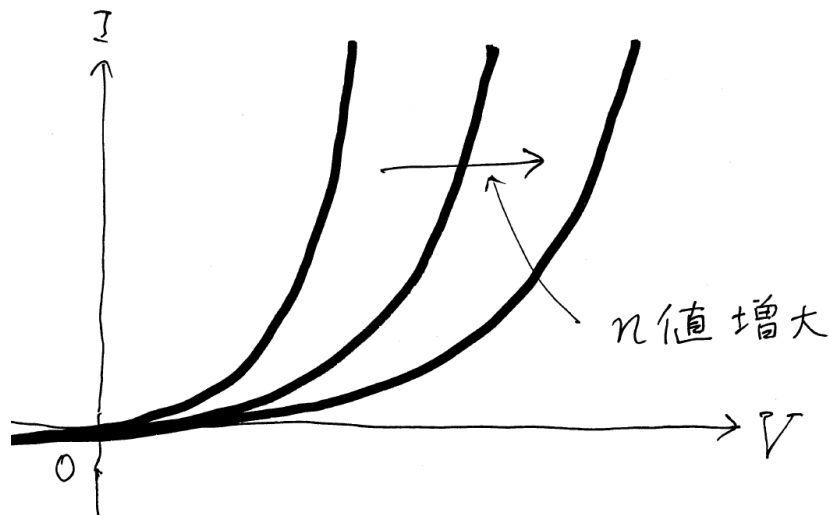
この係数nは**ダイオード理想係数**と呼ばれ、 $1 \leq n \leq 2$ の範囲の値をとるとされる。ダイオードが理想的なときには $n = 1$ なので、 $n \geq 1$ の時にはダイオードは非理想的であり、**pn接合の品質が理想的な品質から遠ざかるに従ってnの値が増大**することになる。

以下においては、nの値が $n > 1$ となることが、太陽電池のI-V特性に与える影響を考察する。

まず、⑤式で与えられるI-V特性のn依存性を図示するならば、図90によって与えられる。

図90を見ると、 $n$ の値が増大するに従って、同じ $I$ の値を与える $V$ の値が大きくなる。従って、 $n$ の値が増大した太陽電池の開放電圧は、①式で与えられる $V_0$ 以上の大きな値を示す(従って図67-2の太陽電池よりも高い変換効率を示す)という期待を持つかも知れない。

実際のところ、ダイオードの $I$ - $V$ 特性が⑤式で与えられるならば、それを用いて構成された図67-2の $I$ - $V$ 特性は次式で与えられる。



$$I = I_S \left\{ \exp \left( \frac{eV}{nk_B T} \right) - 1 \right\} - I_0 \quad \text{⑥}$$

図90

⑤式で与えられる $I$ - $V$ 特性の $n$ 依存性(模式図)

従って、図67-2の開放電圧である $V_0$ の値は、⑥式において左辺=ゼロとおいた式を $V$ について解くことにより、次式で与えられる。

$$V_0 = n \left( \frac{k_B T}{e} \right) \ln \left\{ \left( \frac{I_0}{I_s} \right) + 1 \right\} \quad \text{⑦}$$

従って、 $n$ の値が増大した太陽電池の開放電圧は、①式で与えられる $V_0$ 以上の大きな値を示す（従って図67-2の太陽電池よりも高い変換効率を示す）という期待を持つかも知れない。

しかしながら、実際にはそれは誤りである。

なぜならば、 $n$ の値が増大するということはpn接合の品質が低下することを意味するが、pn接合の品質が低下するときは $I_s$ の値も増大するからである。

そして経験的には、pn接合の品質が低下するときは、 $n$ の値が増大する影響よりも $I_s$ の値が増大する影響の方が強く現れて、結局は $V_{OC}$ は低下する。

⑥式で与えられるI-V特性に対して、これを更に現実的なI-V特性に近付けるための方法のひとつとして、図67-9に示すように、これに $R_{sh}$ と $R_{ser}$ を追加する方法がある。その場合に得られるI-V特性は、連立方程式として、次式で与えられる。

$$I = I_S \left\{ \exp \left( \frac{ev}{nk_B T} \right) - 1 \right\} + \frac{v}{R_{sh}} - I_0 \quad (8)$$

$$v = V + R_{ser} I \quad (9)$$

⑧、⑨式を連立させて解析的な解を求めることは、初等関数の範囲内では不可能であるが、**LambertのW関数**  $W = W(x)$  を用いると、その解は次式で与えられる。

$$I = \left\{ \frac{R_{sh}(I_S + I_0) - V}{R_{ser} + R_{sh}} \right\} - \left( \frac{nk_B T / e}{R_{ser}} \right) W(x) \quad (10)$$

但しここで、 $x$ は次式で与えられる。

$$x = \left\{ \frac{R_{ser} R_{sh} I_S}{(R_{ser} + R_{sh}) nk_B T} \right\} \exp \left[ \frac{R_{sh} \{ R_{ser} (I_S + I_{SC}) + V \}}{(R_{ser} + R_{sh}) nk_B T} \right] \quad (11)$$

# まとめ

- (1) 単接合太陽電池の基本等価回路を紹介し基本動作としての、電流・電圧特性を紹介した。
- (2) 太陽電池の基本等価回路を理解するためには、理想的な電源の性質、特に内部抵抗と短絡電流および開放電圧を理解することが出発点となる。
- (3) 理想的な電源に対して有限の内部抵抗と短絡電流および開放電圧を与えたものは、現実的な太陽電池や電源の良いモデルとなっている。
- (4) 太陽電池においては、暗状態の電流・電圧曲線と光照射下の電流・電圧曲線は異なることが普通であり、両者を比較することが、その状態を詳しく知る手掛かりとなる。