

正しい太陽電池モジュール診断についての一考察

PVResQ!・産業技術総合研究所 池田一昭

日本太陽エネルギー学会・太陽光発電部会・第4回セミナー「太陽光発電システムの運用と保守」@ 東京理科大・森戸記念館, 2013.06.03

「診断」とは「調査（測定）」して「判断（解釈）」すること

- ・太陽電池モジュール（mdl）の不具合・故障とは？
… 明確な定義はありません。
- ・不具合・故障をどのように調べれば良いのか？
… 確立された手法はありません。
- ・調べた結果をどのように解釈すれば良いのか？
… 容易ではありません。

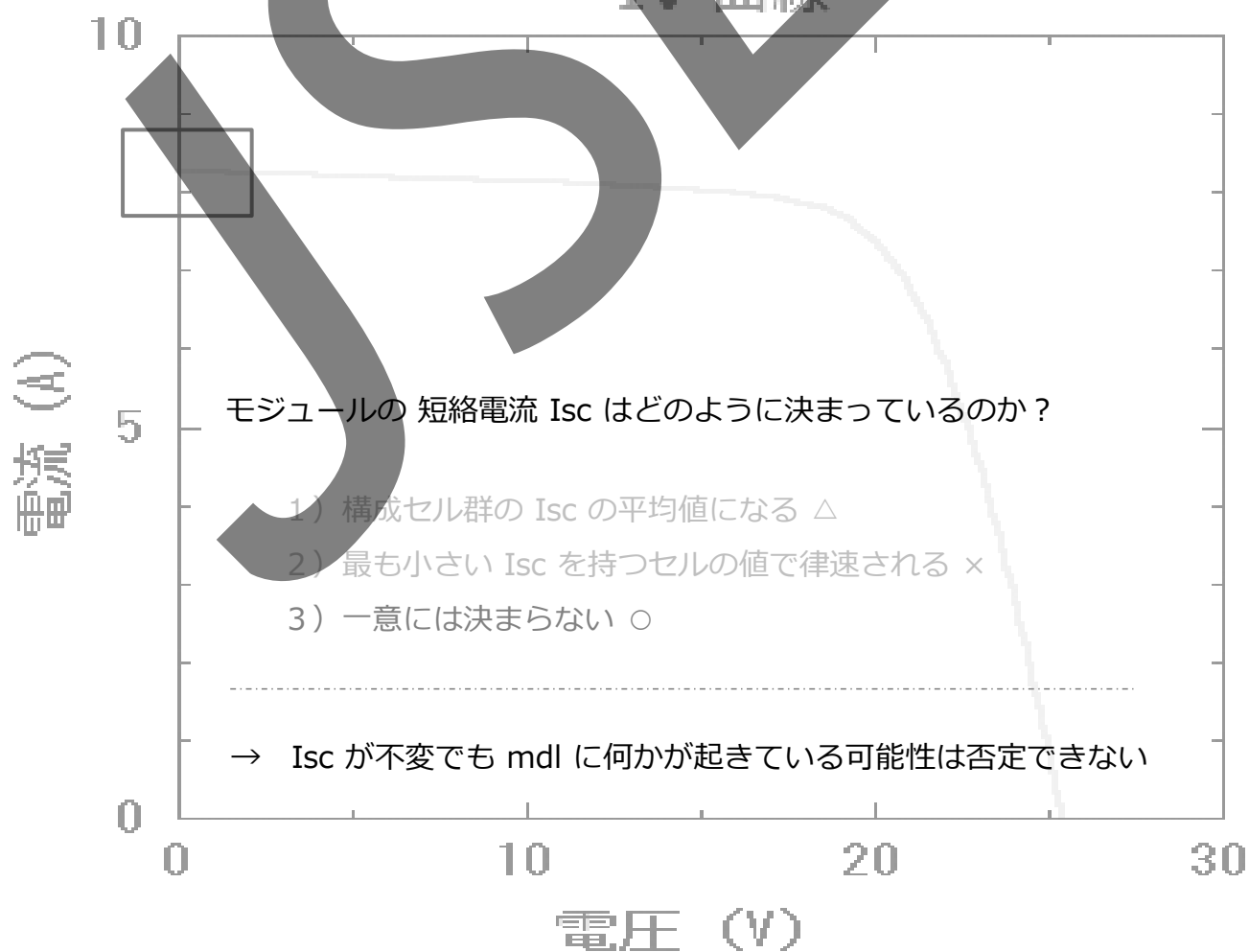
→ 「今すぐ」にでもこれらの問いに「答え」を示す必要がある！

“ 一方で、現状の我々は診断するための「基礎体力」を養成中 ”

誠に面目ございません・・・

正しいモジュール診断のための第一章

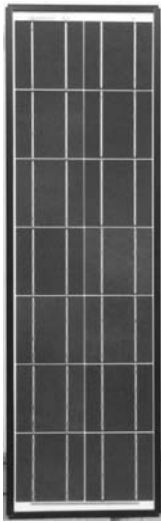
IV 曲線



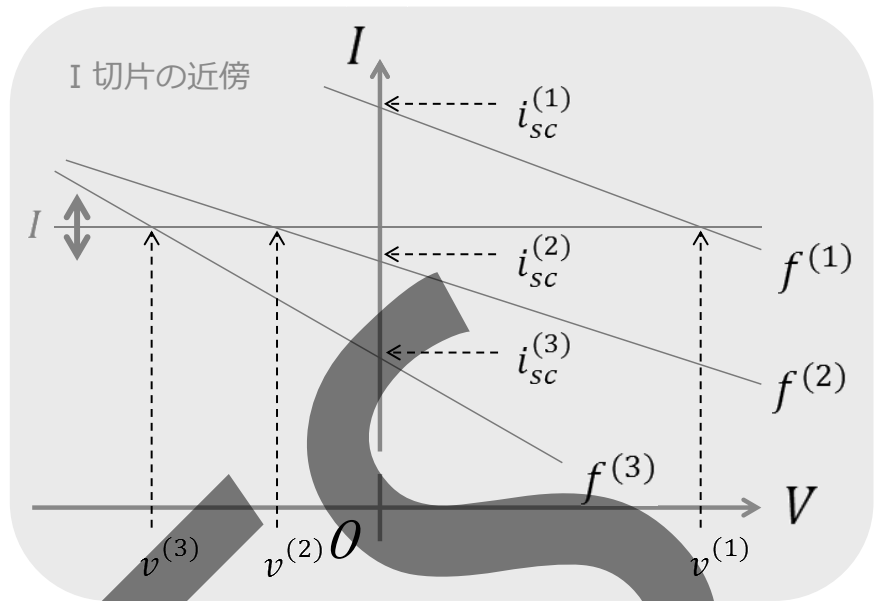
単クラスタ型モジュールの場合の Isc 値

I_{sc}^* : モジュールの短絡電流値

各セルのIV曲線 : $I = f^{(i)}(V)$



単クラスタ型モジュール ($i = 1 \sim 14$)



I のうちで $0 = \sum_i v^{(i)}$ となる電流値が I_{sc}^*

いわゆる「逆バイアス電圧」の印加状態

・短絡時のクラスタ内ではセル同士が電圧を印加したり、**印加されたり**の「おしくらまんじゅう」

※ クラスタ : モジュール内で1つのバイパスダイオード (BPD) により両端を繋がれた直列接続のセル群

単クラスタ型モジュールの場合の Isc 値 (近似計算)

見かけの並列抵抗値 : $A_{rsh}^{(i)} = \left\{ - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} \right\}^{-1}$, $A_{rsh}^* \equiv \frac{1}{n} \sum_i A_{rsh}^{(i)}$

$$0 = \sum_i v^{(i)}$$

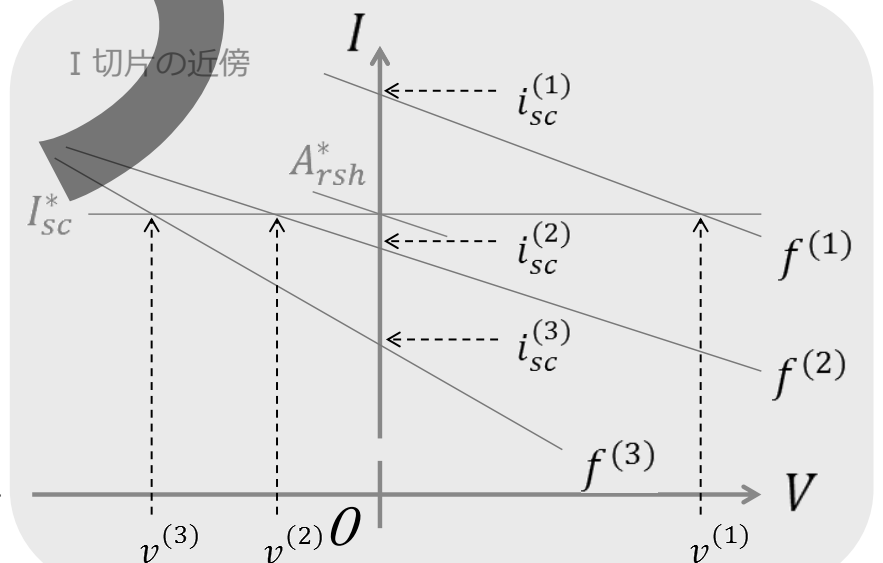
近似[1]

$$\frac{v^{(i)}}{I_{sc}^* - i_{sc}^{(i)}} \sim A_{rsh}^{(i)} \quad \text{を用いて}$$

$$I_{sc}^* = \frac{\sum i_{sc}^{(i)} \cdot A_{rsh}^{(i)}}{\sum A_{rsh}^{(i)}}$$

近似[2]

さらに $A_{rsh}^{(i)} \sim A_{rsh}^*$ を用いると



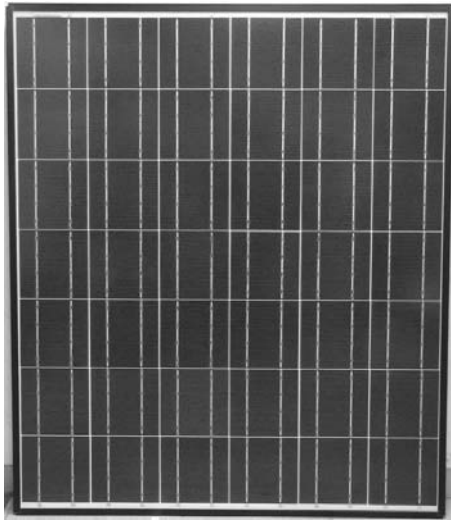
$$I_{sc}^* = \frac{1}{n} \sum_i i_{sc}^{(i)} \quad \leftarrow \quad \text{mdl の Isc が「各セルの Isc の平均値」で決まっている}$$

- ・近似[1], 近似[2] が成り立たない場合は, それぞれ1段上の式まで戻る
- ・近似[2] が成立しない場合 : 並列抵抗値が大きいセルの Isc 値に引きずられる

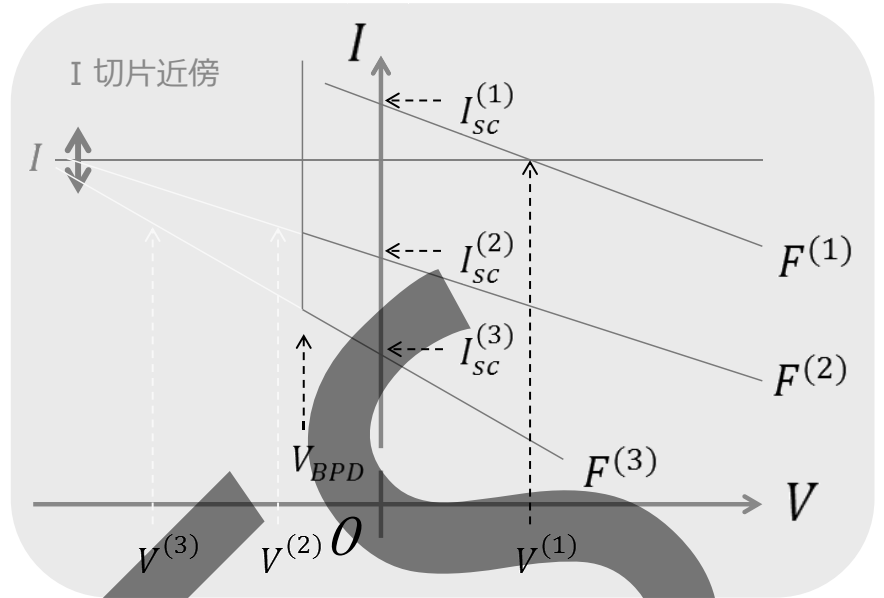
複数クラスタ型モジュールの場合の I_{sc} 値

V_{BPD} : BPD 動作電圧

各クラスタのIV曲線 : $I = F^{(i)}(V)$



複数クラスタ型モジュール



I のうちで $0 = \sum_i V^{(i)}$ となる電流値が I_{sc}^* ただし, $V^{(i)} < V_{BPD}$ のとき $V^{(i)} = V_{BPD}$

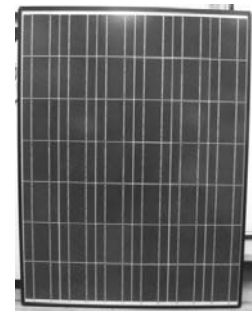
- I_{sc} 出力 (= 特性 × 入射光量) の大きいクラスタが mdl の I_{sc} を決めている (ことが多い)
- 短絡時に mdl 内ではクラスタ同士が電圧で「おしくらまんじゅう」; 最大逆バイアス電圧 = V_{BPD}

セルへの光量不足がIV曲線および特性値に及ぼす変化について調査

目的 : 劣化 mdl の評価パラメータを検討する

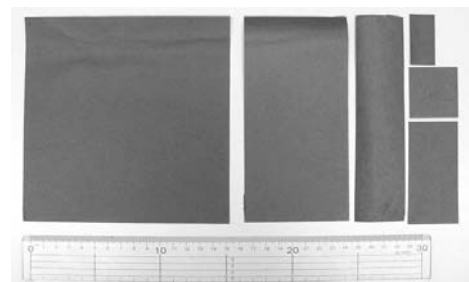
サンプル : SHARP製 ND-153AU
(6 inch・mc-Si, 42直列=7行×6列, 3 クラスタ※)

試験内容 : mdl内のセルに黒紙 (Mask) を貼り付けてIV測定を実施



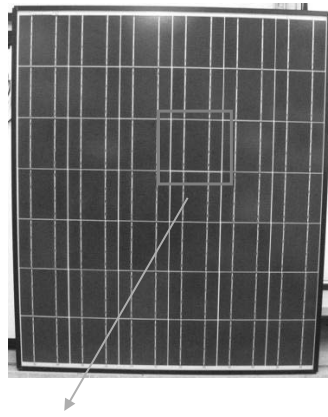
- 黒紙 : 基準 = 158mm角
サイズ = 1/1, 3/4, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32

- 遮光位置 : No.17セル



※ クラスタ : モジュール内で1つのバイパスダイオード (BPD) により両端を繋がれた直列接続のセル群

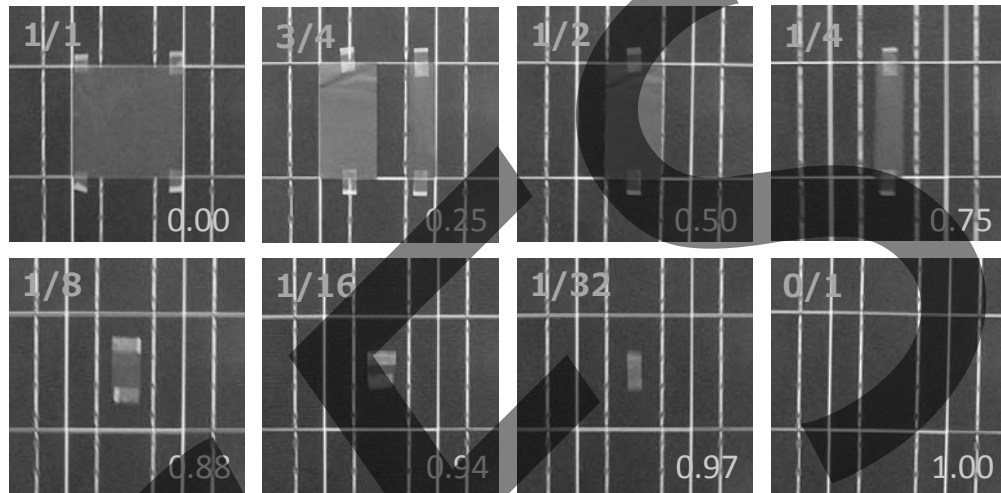
No.17 セル上への Mask



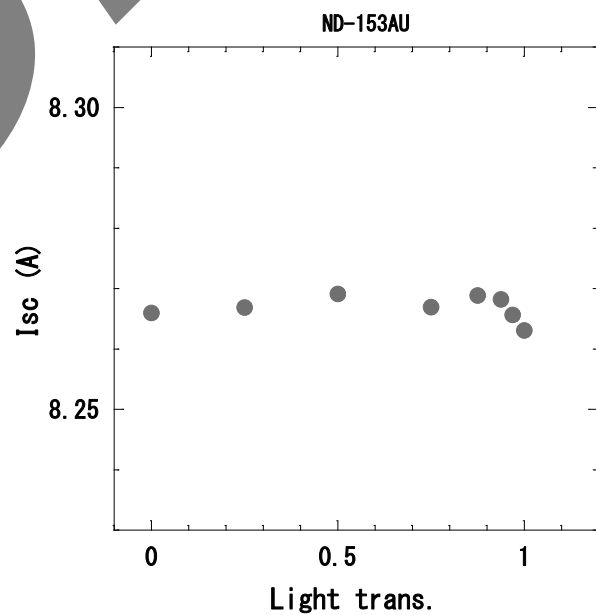
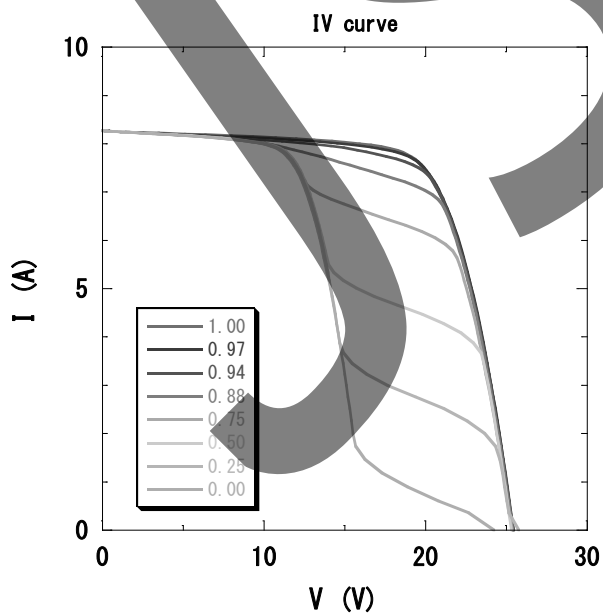
42	29	28	15	14	1
41	30	27	16	13	2
40	31	26	17	12	3
39	32	25	18	11	4
38	33	24	19	10	5
37	34	23	20	9	6
36	35	22	21	8	7

Mask率

光透過率



No.17 セル上へ Mask 設置時の mdl の IV 曲線と Isc 値の変化



mdl 内のあるセルの電流出力が低下しても mdl の Isc には反映されない（場合がある）

・ 単クラスタからなるモジュール

- I_{sc} は「おおむね」構成セルの I_{sc} の平均値で可算

$$I_{sc}^* = \frac{1}{n} \sum_i i_{sc}^{(i)} \quad \text{ただし} \quad \frac{v^{(i)}}{I_{sc}^* - i_{sc}^{(i)}} \sim A_{rsh}^{(i)} \quad \text{かつ} \quad A_{rsh}^{(i)} \sim A_{rsh}^*$$

- 並列抵抗値が「重み」として I_{sc} に寄与することをお忘れなく

$$I_{sc}^* = \frac{\sum i_{sc}^{(i)} \cdot A_{rsh}^{(i)}}{\sum A_{rsh}^{(i)}} \quad \text{ただし} \quad \frac{v^{(i)}}{I_{sc}^* - i_{sc}^{(i)}} \sim A_{rsh}^{(i)}$$

- セル特性がばらつく場合は上記ほど単純には I_{sc} が決まらない

$$0 = \sum_i v^{(i)}$$

- セルに起きたイベントは I_{sc} を変動させる

・ 複数クラスタからなるモジュール

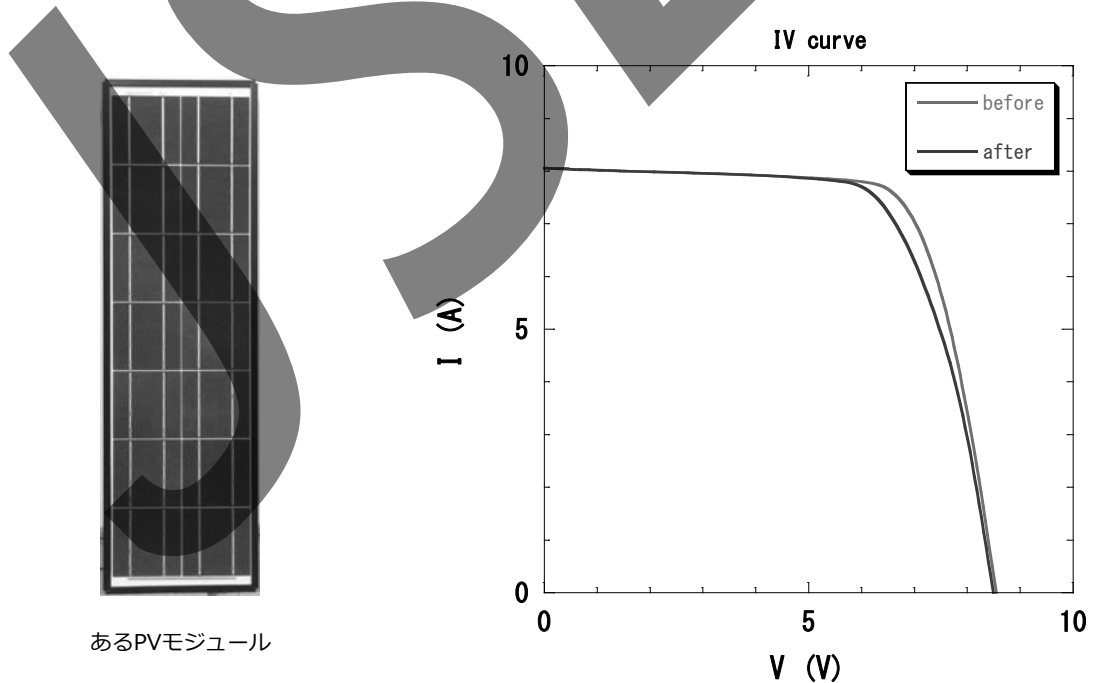
- I_{sc} が大きめのクラスタが I_{sc} を決めている（場合が多い）

$$0 = \sum_i v^{(i)} \quad \text{ただし, } v^{(i)} < V_{BPD} \quad \text{のとき} \quad v^{(i)} = V_{BPD}$$

- I_{sc} への寄与が小さいクラスタに起きたイベントはさほど I_{sc} を変動させない

モジュール と セル は「異なる」ものです

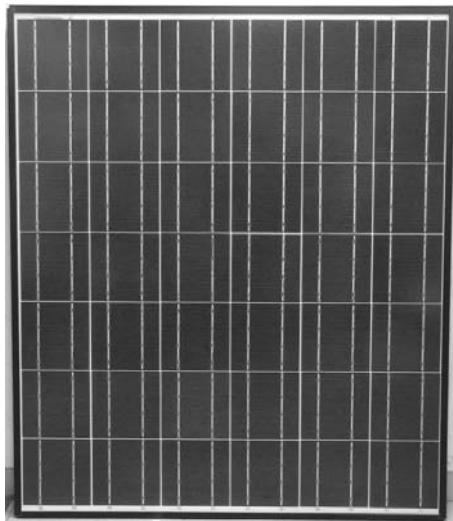
あるPVモジュールが下図のようなIV曲線の変化を示しました。



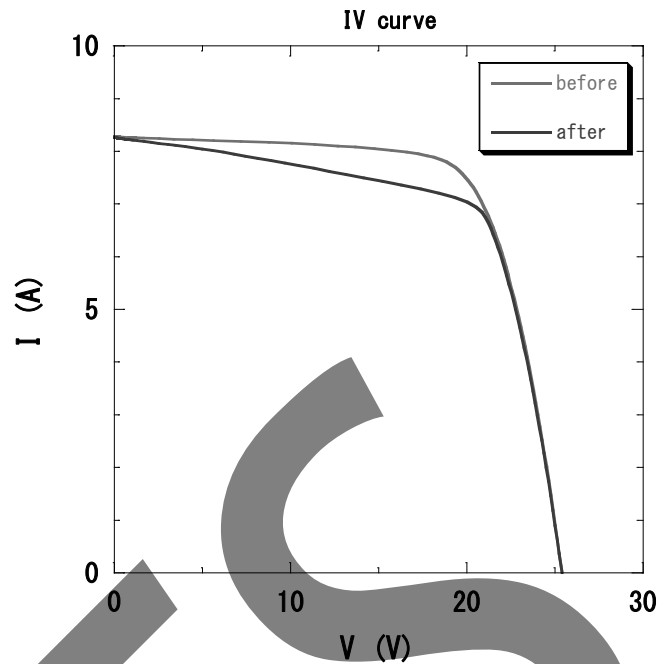
設問 1 : この変化を引き起こしたイベントは次のうちどれでしょうか？

- 1) 入射光量の減少
- 2) 並列抵抗値の減少
- 3) 直列抵抗値の増大

また別のPVモジュールが下図のようなIV曲線の変化を示しました。



別のPVモジュール

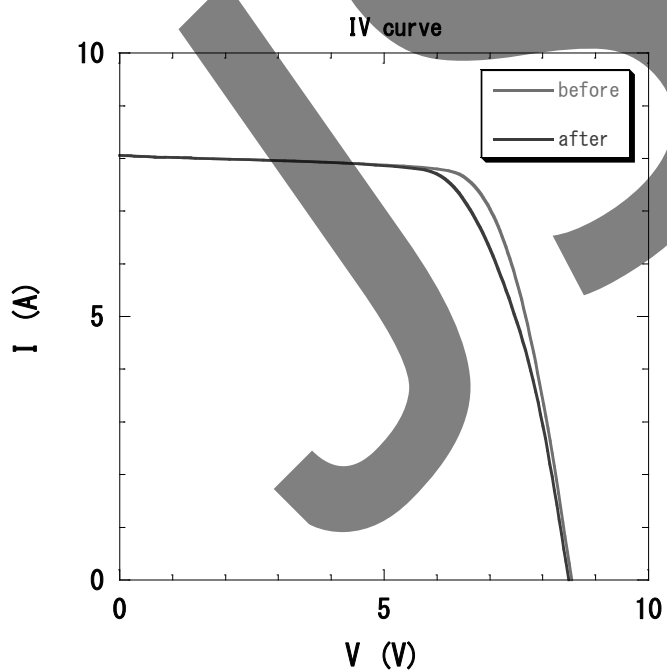


設問 2 : この変化を引き起こしたイベントは次のうちどれでしょうか？

- 1) 入射光量の減少
- 2) 並列抵抗値の減少
- 3) 直列抵抗値の増大

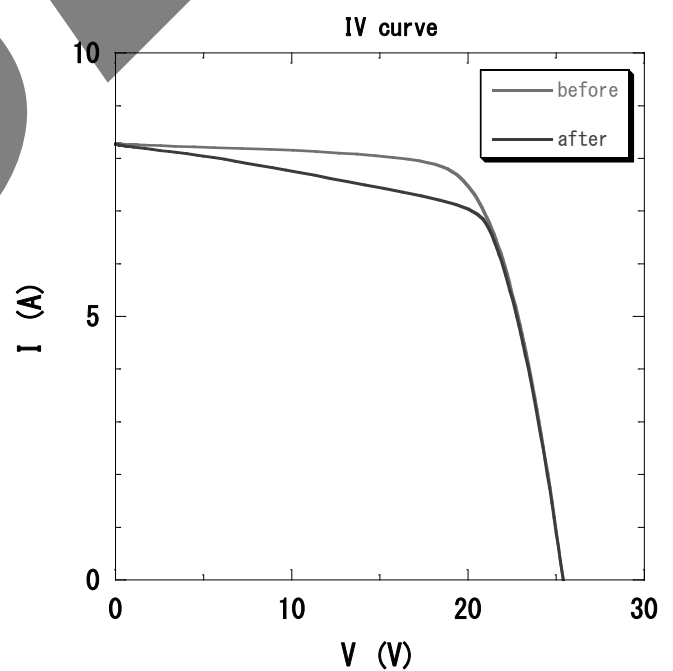
<正解>

設問 1



- 1) 入射光量の減少
- 2) 並列抵抗値の減少 ○
- 3) 直列抵抗値の増大 ×

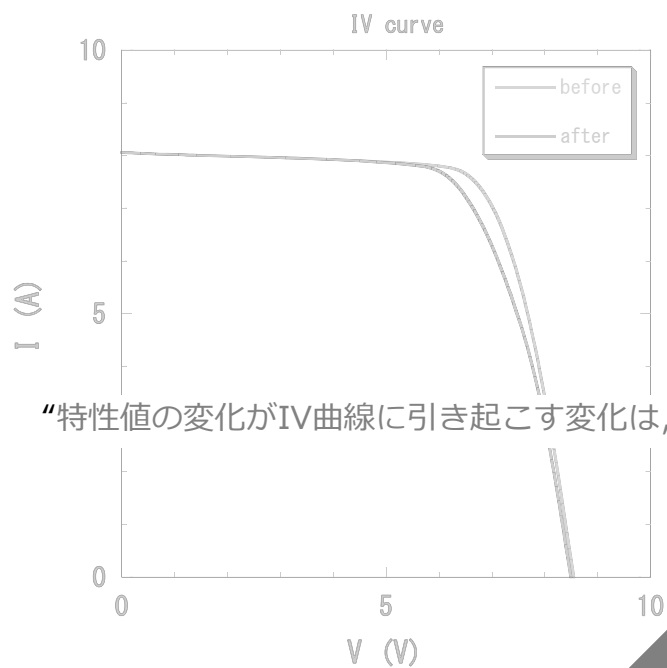
設問 2



- 1) 入射光量の減少 ○
- 2) 並列抵抗値の減少 ×
- 3) 直列抵抗値の増大

<正解>

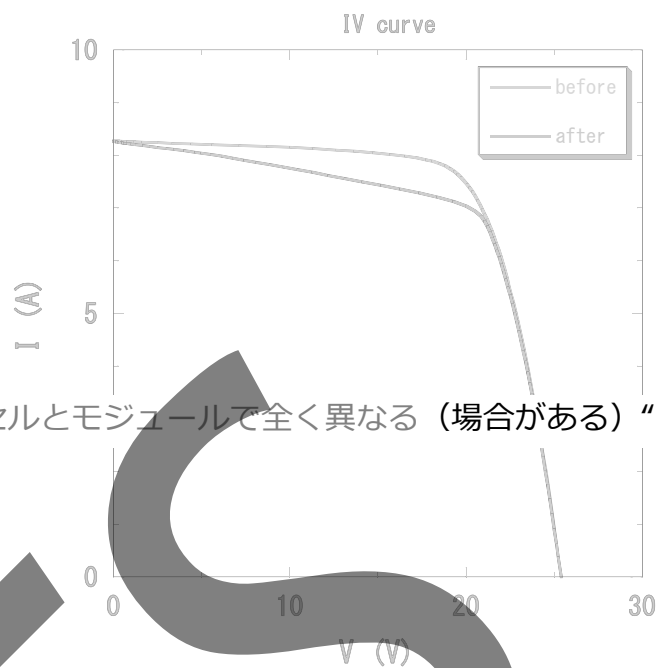
設問 1



“特性値の変化がIV曲線に引き起こす変化は、セルとモジュールで全く異なる（場合がある）”

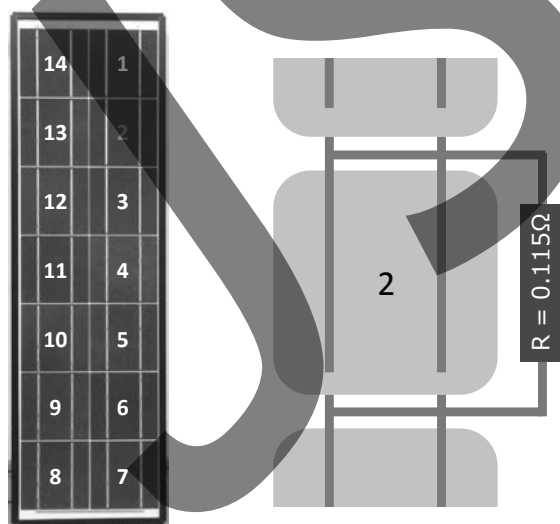
- 1) 入射光量の減少
- 2) 並列抵抗値の減少
- 3) 直列抵抗値の増大

設問 2

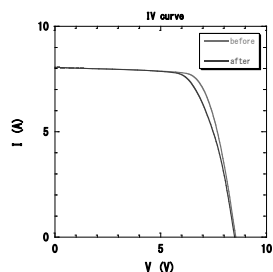


- 1) 入射光量の減少
- 2) 並列抵抗値の減少
- 3) 直列抵抗値の増大

設問 1 の答え： No.2 セルに抵抗器を並列接続しました（抵抗値 = 0.115Ω ）



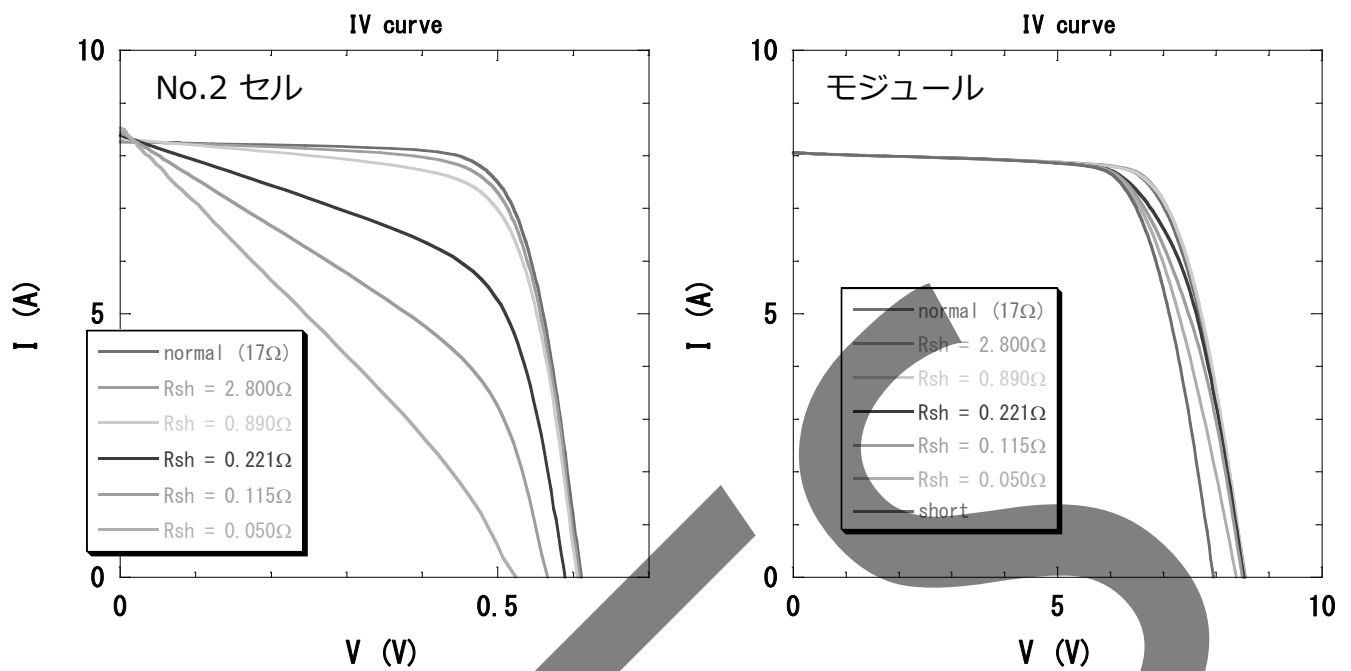
あるPVモジュール



あるセルの並列抵抗値が減少した

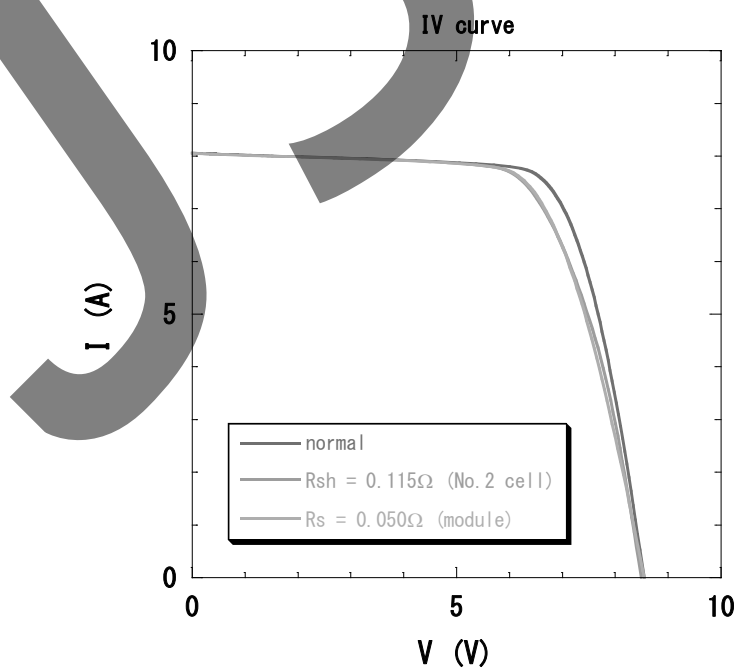
= モジュールの直列抵抗値が上がったわけではない

「No.2 セルの並列抵抗値」の変化によるIV曲線の変化



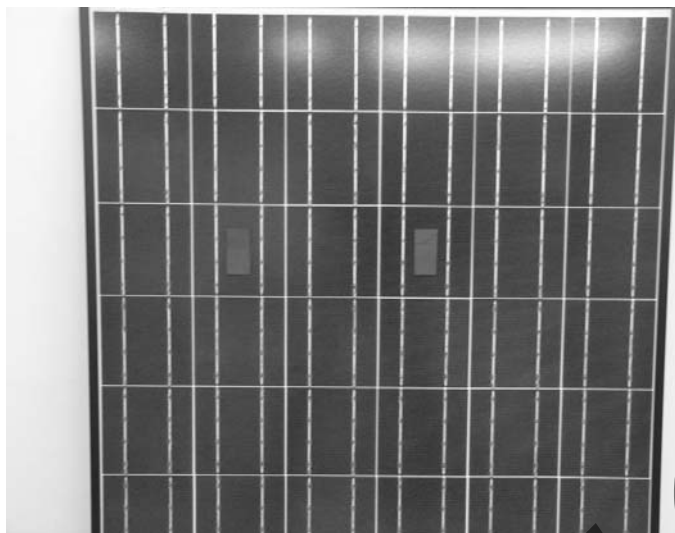
- ・「セル」の特性変化が「モジュール」のIV曲線内のある一部で変化を生じさせる

「No.2 セルの並列抵抗値」と「モジュールの直列抵抗値」の変化によるIV曲線の変化

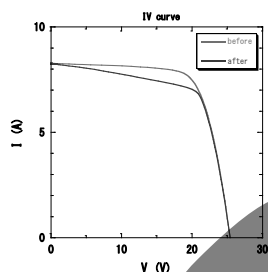


- ・「並列抵抗値」と「直列抵抗値」のどちらの効果でもほぼ同じ形状の曲線が生じ得る

設問2の答え： No.17 セルと No.31 セルに黒紙を貼りました（サイズ = 1/8 セル）



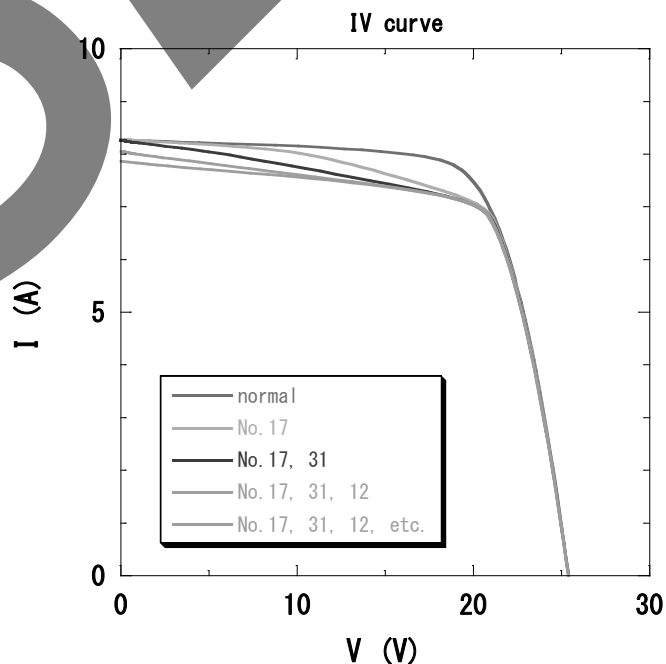
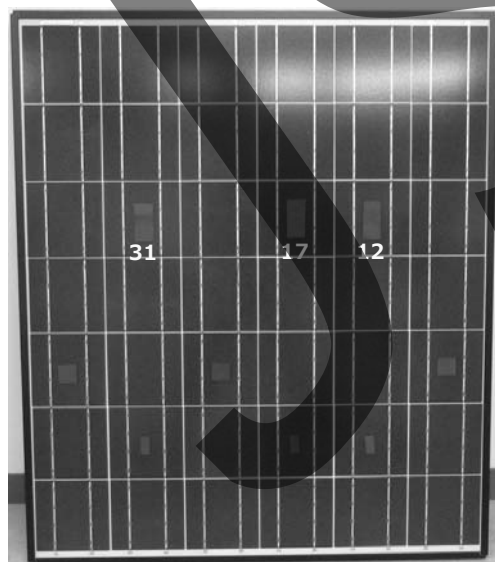
42	29	28	15	14	1
41	30	27	16	13	2
40	31	26	17	12	3
39	32	25	18	11	4
38	33	24	19	10	5
37	34	23	20	9	6
36	35	22	21	8	7



あるセルへの入射光量が減少した

= モジュールの並列抵抗値が下がったわけではない

セルへの入射光量の変化によるIV曲線の変化



・遮光されたセルの逆バイアス側の並列抵抗特性が見えてしまう

・セル割れによって同様のIV曲線が生じる

・多数セルの順バイアス側の並列抵抗が一斉に減少しても同様のIV曲線が生じる（eg. PID現象）

< IV曲線を解釈する上での注意事項 >

“特性値の変化がIV曲線に引き起こす変化は、セルとモジュールで全く異なる（場合がある）”

・・・セルの特性変化はモジュールの特性の一部として反映される・・・

→ 漠然とした理解，安易な推測，根拠のない定説（？）から脱却しましょう

“ 丁寧に考えましょう ”

“異なるイベントが同じIV曲線を構築し得る”

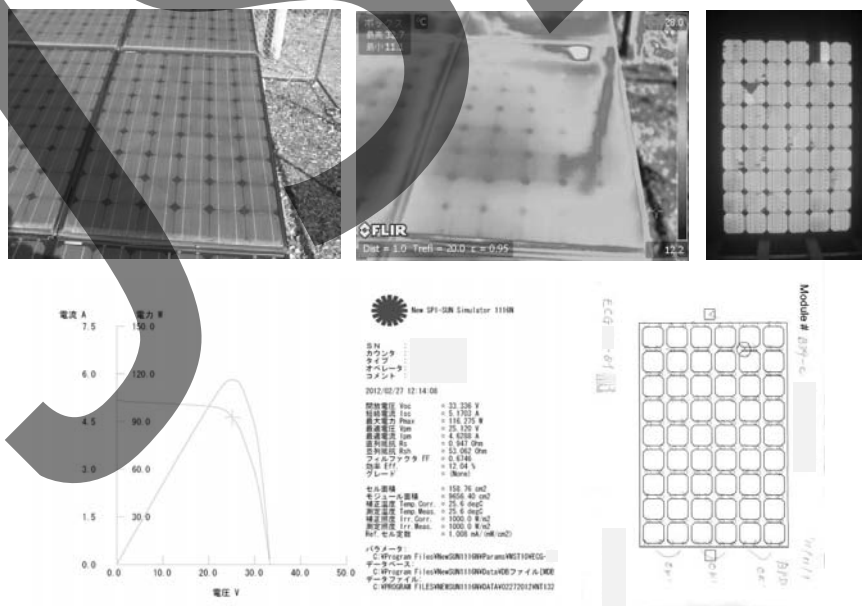
・・・「IV曲線」と「イベント」の関係は1対1ではない（1対n）・・・

→ 「IV曲線」から「イベント」を推定するのは難しい

“ 更に言うと「特性値の変化量」から「イベント」を推定するのは極めて難しい ”

< 正しくモジュールを診断するために >

・「外観」「IV曲線・特性値」「EL像」「熱画像（発電時）」等の多様な情報が必要



・「イベント → IV曲線」について予め知見を持っていることが極めて有用

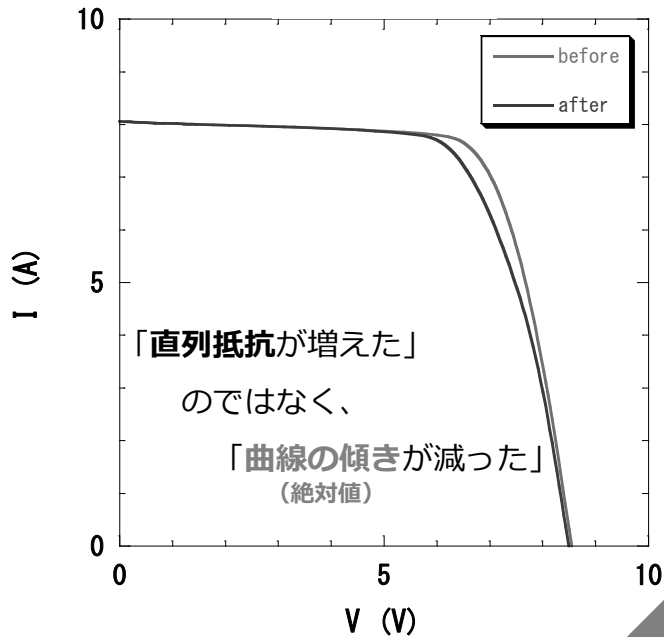
- 答え（症状）が分かっているモジュールを**作成**し，IV曲線（形状）・特性値を知る
- 答え（症状）を持っているモジュールを**抽出**し，IV曲線（形状）・特性値を「正確に」知る

正しいモジュール診断のための第三章

その議論は噛み合っていますか？ また、本質を議論できていますか？

「抵抗値」と「IV曲線の傾き」

第二章・設問 1

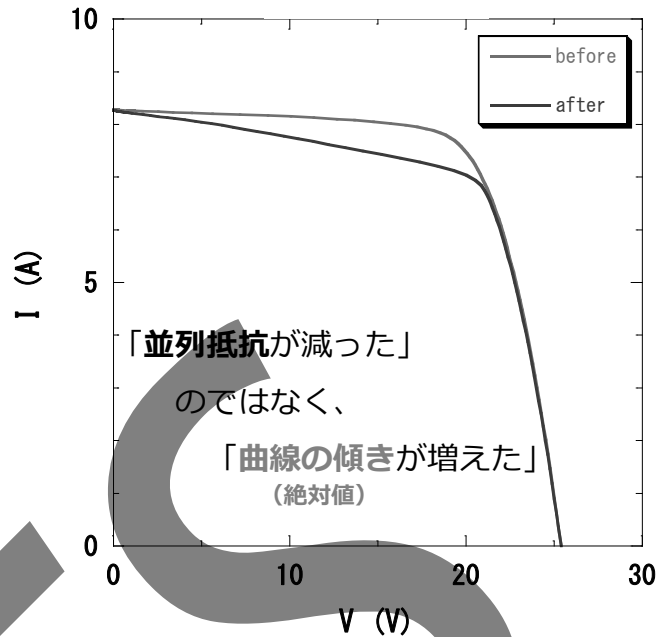


「曲線の傾きが減った」原因は、

- ① セル裏面でタブ線が外れて直列・・・
- ② バスバー電極の接続不備で直列・・・
- ③ あるセルの表裏で絶縁性が低下して並列・・・

ここが本質！

第二章・設問 2



「曲線の傾きが増えた」原因は、

- ① 全てのセルで表裏の絶縁が低下して並列・・・
- ② あるセルへの入射光量が低下して逆バイ・・・
- ③ セル割れが多く発生していて・・・

ここが本質！

従来：「曲線の傾き」＝「抵抗値」

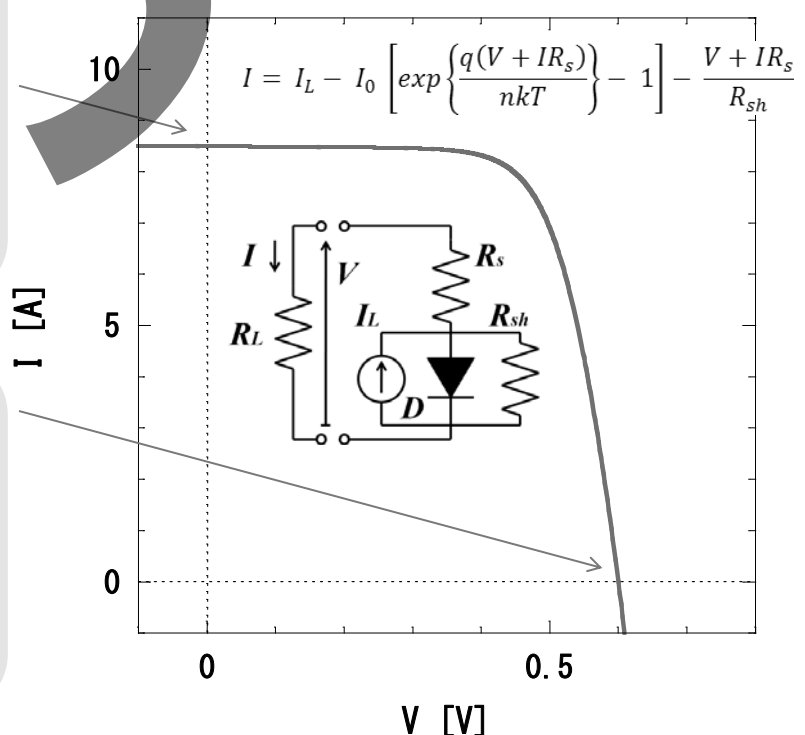
$$R_{sh} = - \frac{1}{\left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=I_{sc}}}$$

並列抵抗

$$R_s = - \frac{1}{\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=V_{oc}}}$$

直列抵抗

I-V curve of a mc-Si cell



等価回路モデル的には妥当

ちなみに、「JIS C 8913 結晶系太陽電池セル出力測定方法」では、、、

R_{sh}

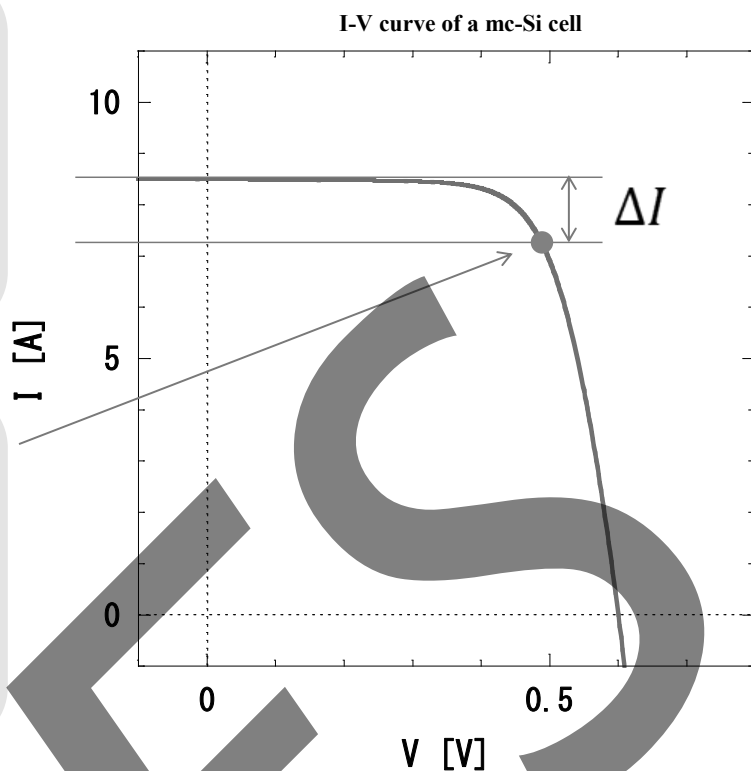
記載はありません

並列抵抗

異なる照度での動作点の変位

$$R_s = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2}$$

直列抵抗



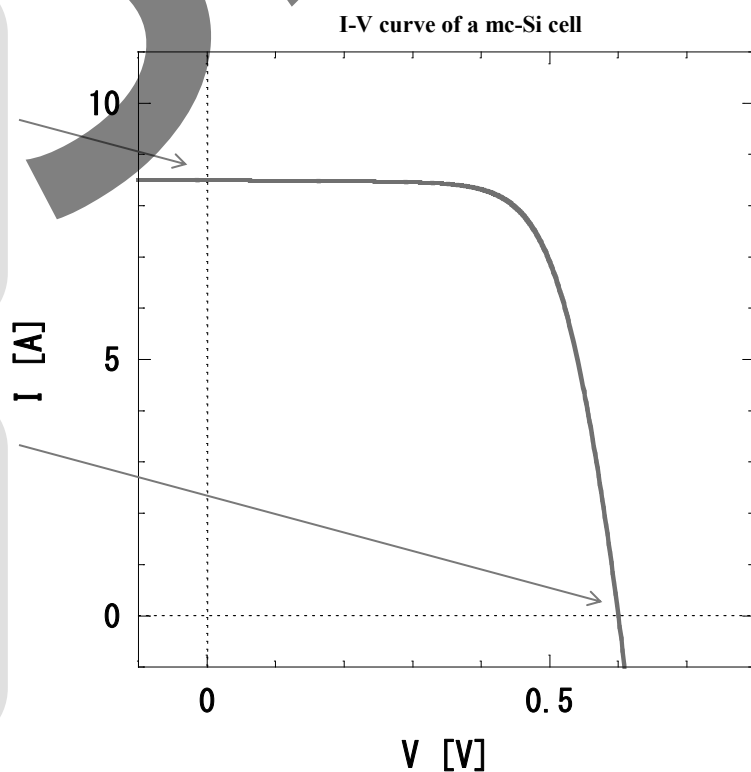
提案：「曲線の傾き」と「抵抗値」とを区別

$$A_{rsh} = - \frac{1}{\left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=I_{sc}}}$$

見かけの並列抵抗

$$A_{rs} = - \frac{1}{\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=V_{oc}}}$$

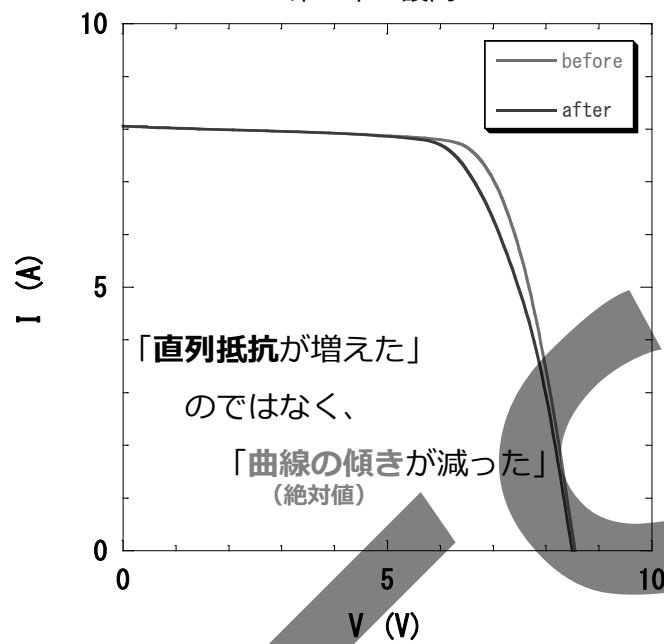
見かけの直列抵抗



A : Apparent = 「見かけの」

「抵抗値」と「見かけの抵抗値」

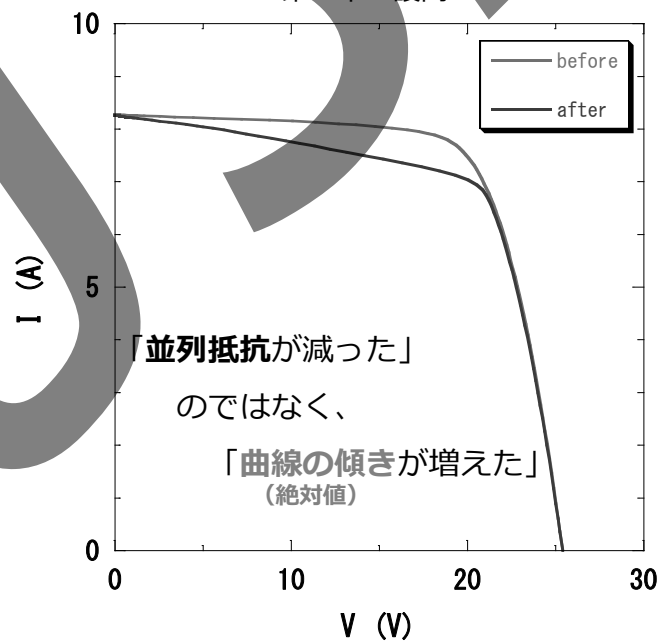
第二章・設問 1



「見かけの直列抵抗が増えた」原因は、あるセルの表裏で絶縁性が低下して並列抵抗が減少したことにある。

「抵抗値」と「見かけの抵抗値」

第二章・設問 2



「見かけの並列抵抗が減った」原因は、一部セルへの入射光量が低下したことにある（逆バイアス電圧印加）。

その議論は噛み合っていますか？ また、本質を議論できていますか？

- ・ 技術用語を「正しく」使いましょう
- ・ 必要な技術用語を定義（採用）しましょう

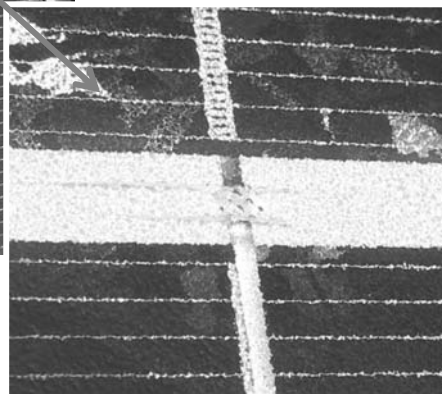
→ 本質を議論しましょう！

同様の事例が周辺で起きていませんか？

正しいモジュール診断のための第四章

セル と セル の間で タブ線 が切れたら、何か起きますか？

セル と セル の間で タブ線 を切ってみました



モジュール特性への影響を調査してみました

目的：タブ断線がモジュールの動作や特性に及ぼす影響を明らかにする


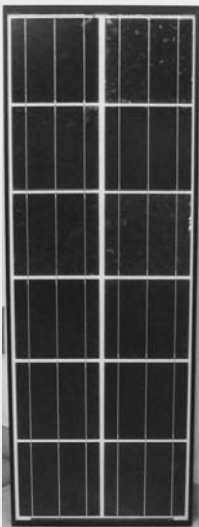
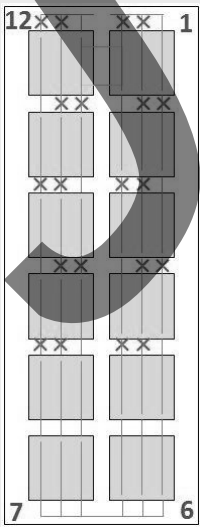


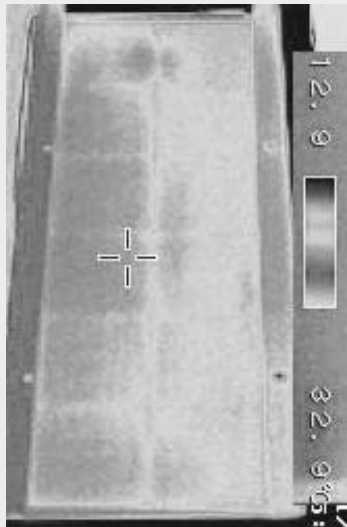
サンプル：京セラ製 SU45T-02（6 inch, 12直列=6行×2列）

試験内容：

- 1) タブ断線前のIV特性測定
- 2) セル - セル間のタブ線を切断
 - ・ 3本タブ線のうち2本を切断
 - ・ 2箇所目以降は電流経路が長くなるように切断
- 3) タブ断線後のIV測定
 - ・ 1箇所後, 5箇所後, 10箇所後
- 4) タブ断線後のEL測定
- 5) タブ断線後のサーモ測定
- 6) タブ断線後の屋外暴露（サーモ観察）



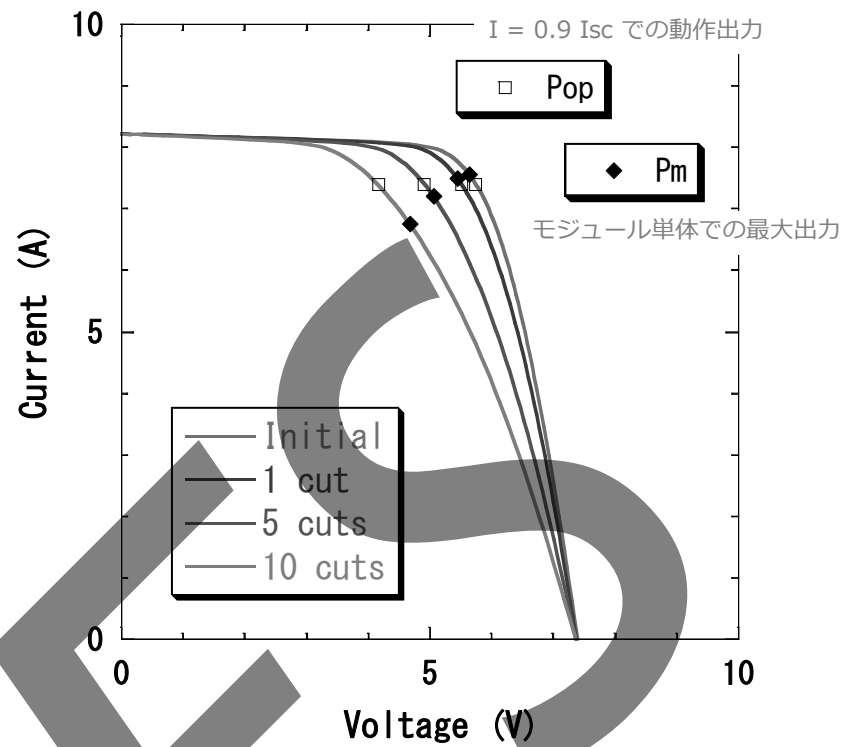
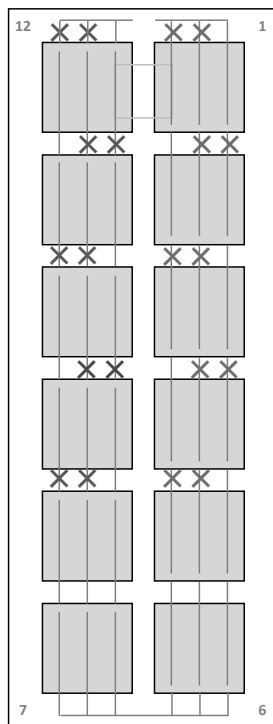
タブ線を単線化した際の症状

可視外観	断線概要	屋内 EL 観察	屋内 IR 観察	屋外 IR 観察
	単線化：10箇所	順電流：8A 30秒露光	順電流：8A 7分経過時	発電模擬（動作電流：6.2A） 7分経過時
				

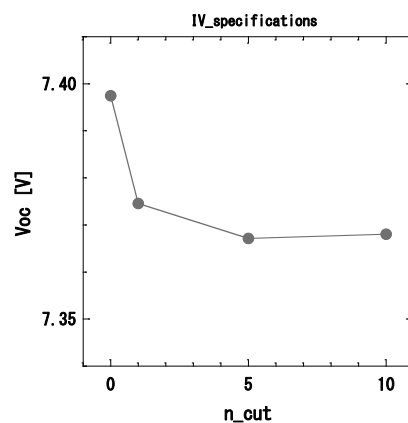
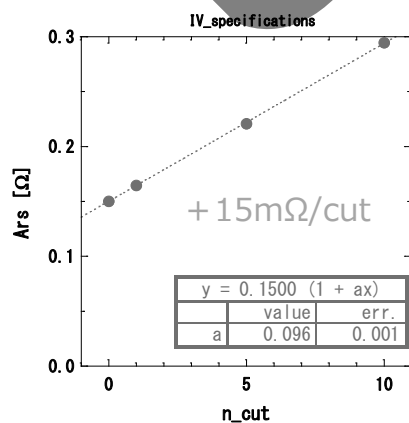
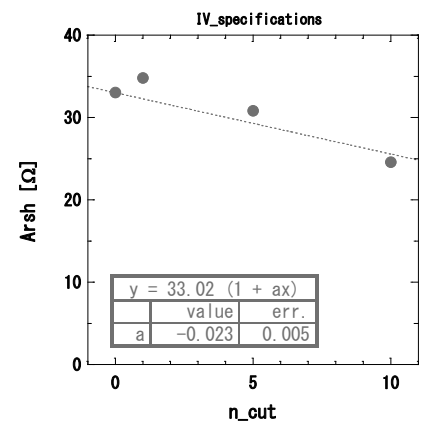
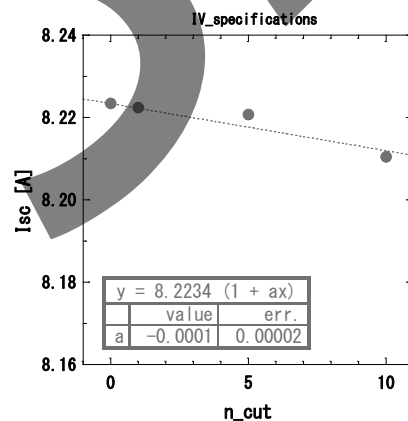
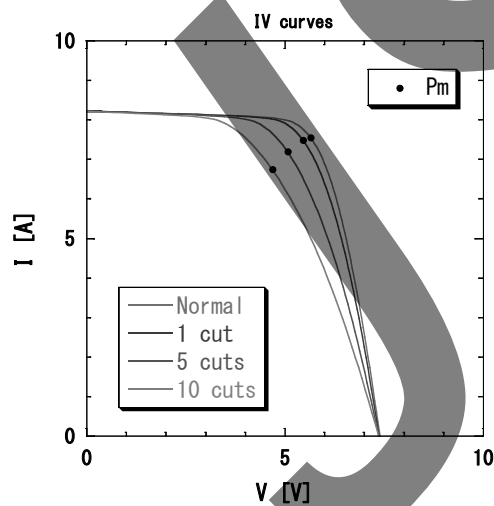
- ・ 順電流による電流集中が屋内 EL, IR 測定により観察できる
- ・ 発電時のモジュール面内の温度むらは単線化との関連が乏しい

IV曲線のタブ切断数に関する依存性

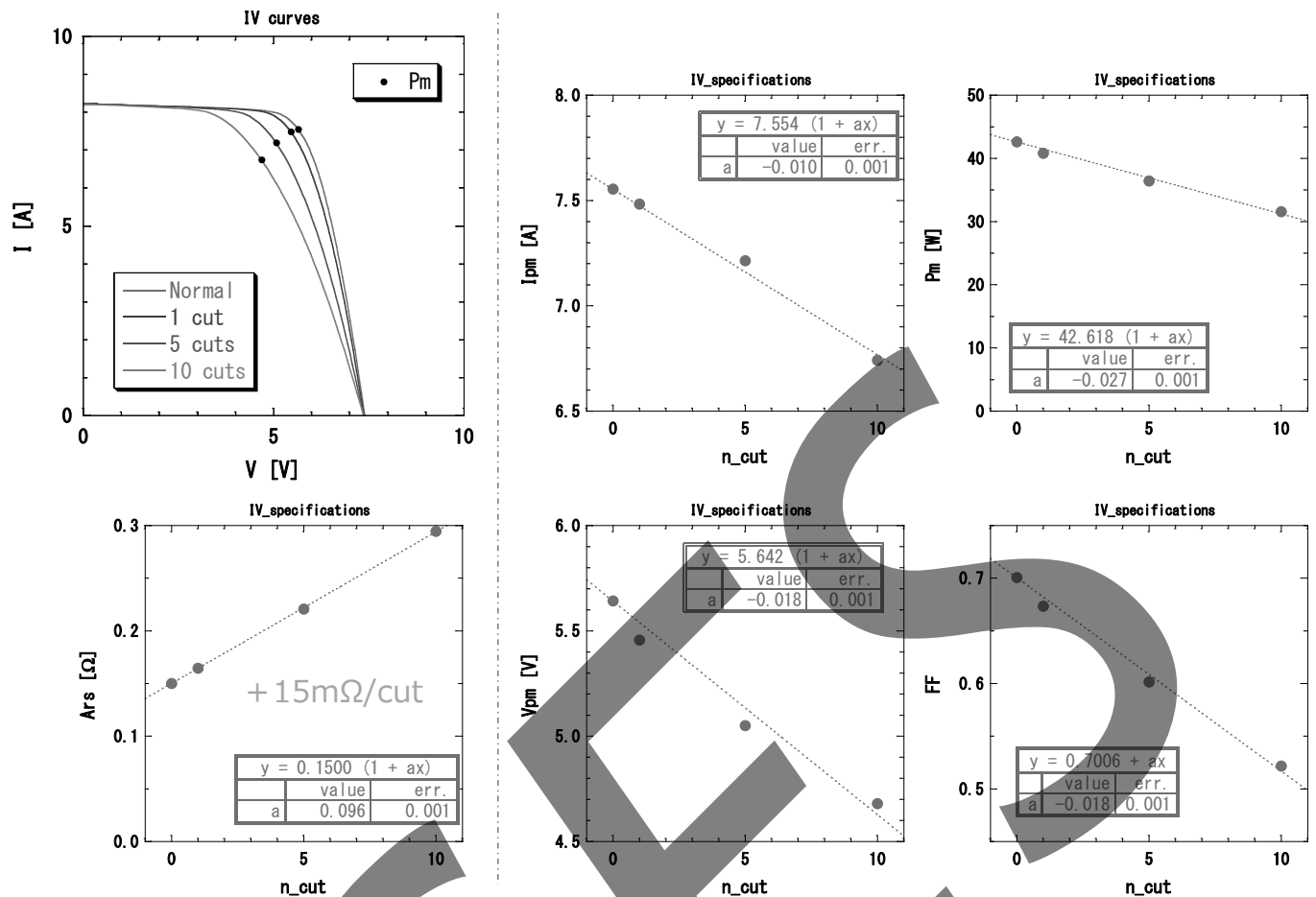
(表)



特性値のタブ切断数に関する依存性 (1)



特性値のタブ切断数に関する依存性（２）



90%の出力を保証するなら、、、

今回のモジュールでは「4箇所」で単線化すると「NG！」

= 継ぎ目は「セル数 + 1 箇所」あるので、4/13（約3割）切れたらダメ

- ・セル1枚の直列抵抗値（初期値）： 10 ～ 15m Ω
 - ・1箇所の切断による抵抗増加量： 10 ～ 15m Ω
- = すべての継ぎ目で切れると直列抵抗が約2倍になる

ikedaの経験則：「直列抵抗が1.7倍」になると出力が 10% down する

“ 7割で切れると、出力が10%減になる（ = 全部切れても15%減） ”

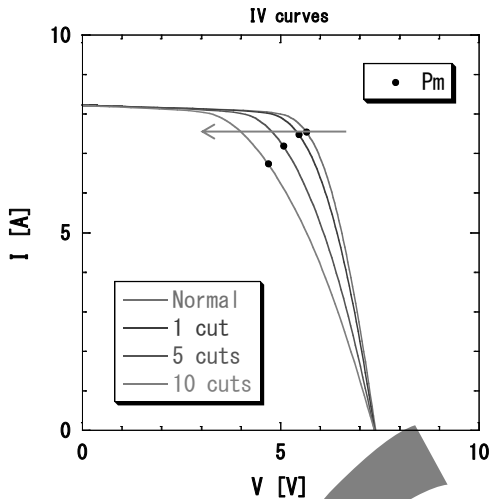
- ・今回のモジュールでは 7割（10本）切れて約25%減
- ・全部（13本）切れて約30%減

ikeda の経験則（1割 1point 則）

“ 直列抵抗が1割（10%）増大すると、FFが 1ポイント 減少する ”

※ 今回は15mΩ（10%）増大すると、FFが 1.8point 減少した

$$FF = \frac{I_{pm} \cdot V_{pm}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \longrightarrow FF(R_s) = \frac{I_{pm} \cdot (V_{pm} - I_{pm} R_s)}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$



$$\delta FF = - \frac{I_{pm}^2 \cdot R_{si}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \frac{\delta R_s}{R_{si}}$$

直列抵抗の初期値

$$I_{pm} \sim 0.9 \cdot I_{sc}, \quad V_{oc} \sim 0.6 V, \quad R_{si} \sim 0.01 \Omega$$

$$\delta FF = - \frac{1}{75} \cdot \frac{\delta R_s}{R_{si}} \cdot I_{sc}$$

$$\frac{\delta R_s}{R_{si}} \sim 0.1, \quad I_{sc} \sim 8 A \longrightarrow \delta FF \sim 0.01$$

セルとセルの間でタブ線が切れたら、何か起きますか？

・タブ切れ箇所の検出

- ○ : EL観察
- ○ : 順電流印加によるサーモ観察
- × : 発電時のサーモ観察

・電流経路が1本だけ残る格好でセルとセルの間のタブ線をすべて切ると、

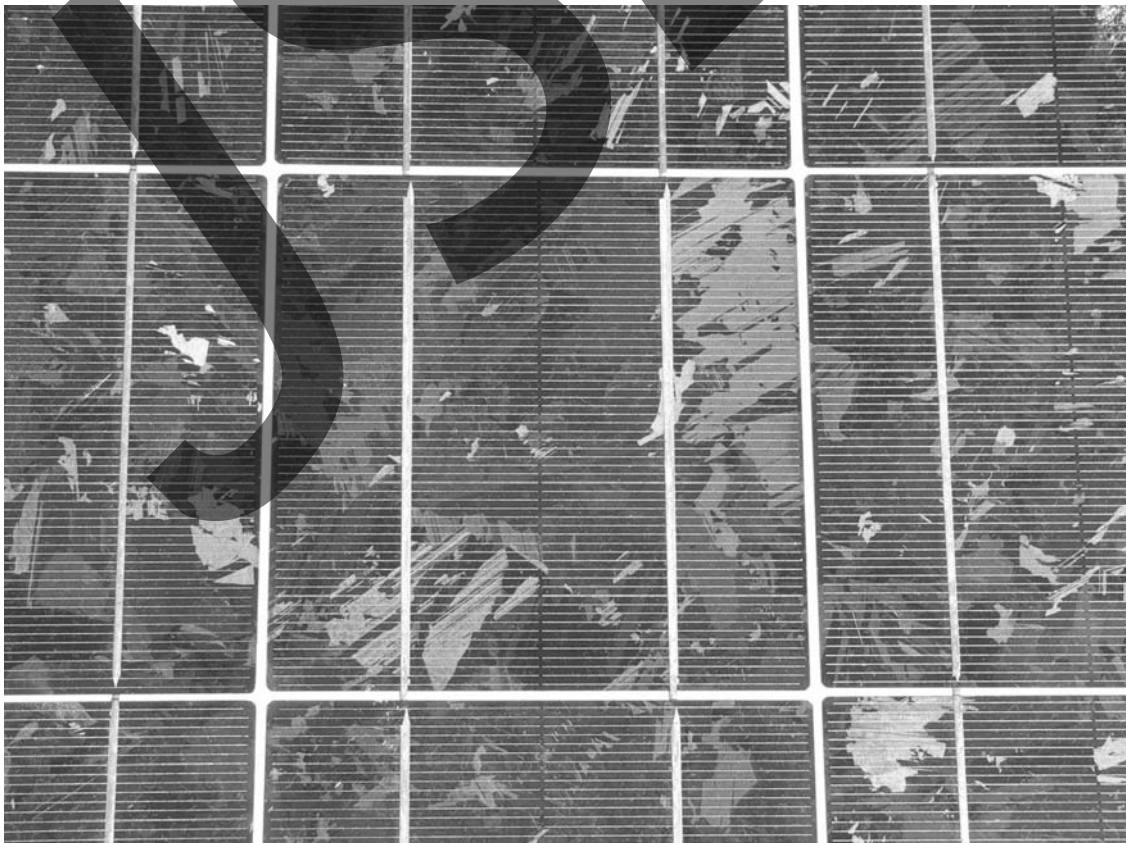
- 直列抵抗値が初期値の約 2 倍になる（今回は約2.5倍）
- 出力が約15%減少する（今回は約30%）

・ 完全断線は比較的安全サイド（除：BPDの耐久性）

・ 微妙につながっていることが発熱の原因

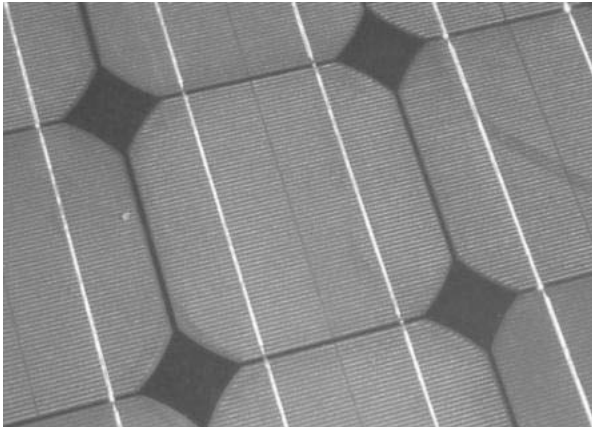
正しいモジュール診断のための第五章

フィンガー電極が真ん中で切れているセル

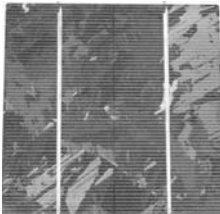
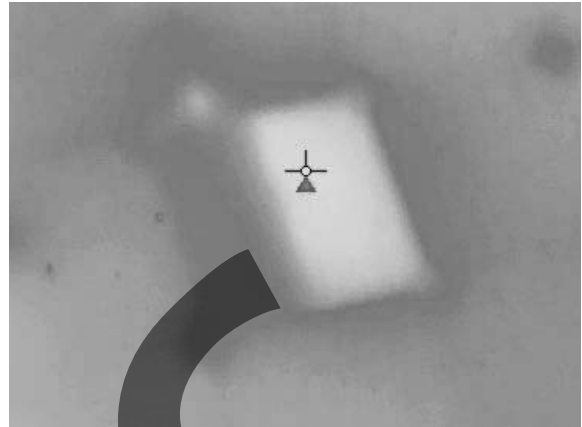


2つのタブ線を流れる電流のアンバランスが発熱を誘起します

<外観観察（表面）>



<サーモ観察（表面）>



- ・このタイプのセルならタブを切った部分を発電時に発見できます
- ・ご注意：「タブ線が切れている」と言っているわけではありません

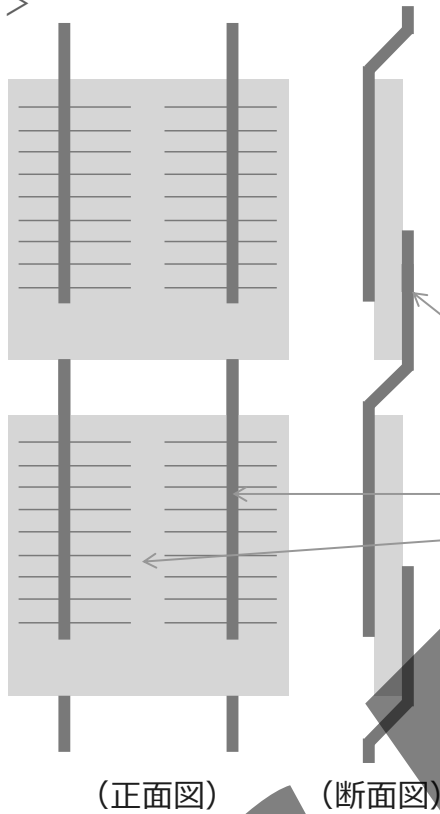
電流のアンバランスとは、、、


2つの電流経路のうち的一方で、電流が流れにくい状況が発生する

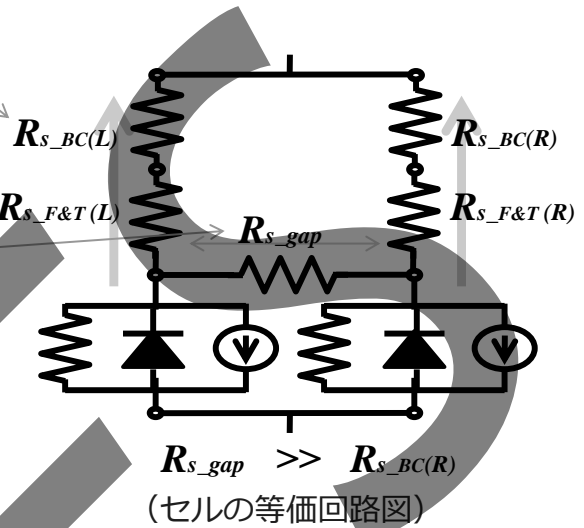
- ・セル裏面側でタブ線が外れる
 - もう少し丁寧に考える → どこが外れる？ 例) セルと裏面電極の間
- ・セルとセルの間でタブ線が切れる
 - 実はあまり見たことがない
- ・タブ線自体が劣化（脆化？酸化？）する
 - ややナンセンスな気がする
- ・他にもあると思います

等価回路図によるタブ線の導通不備による発熱の概説

< 正常 >



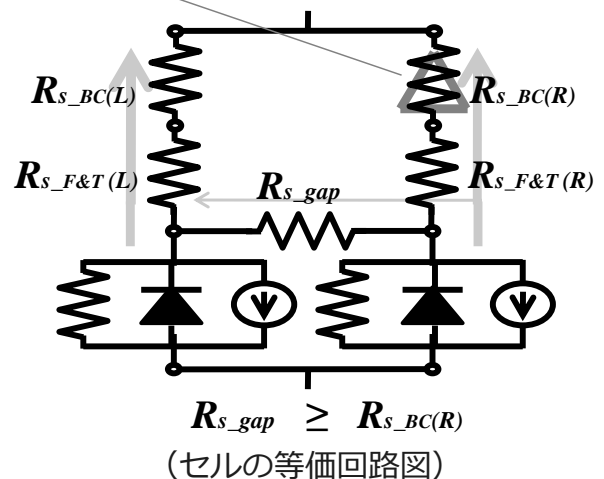
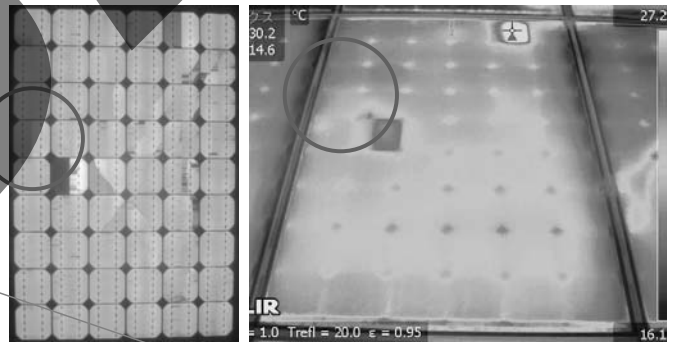
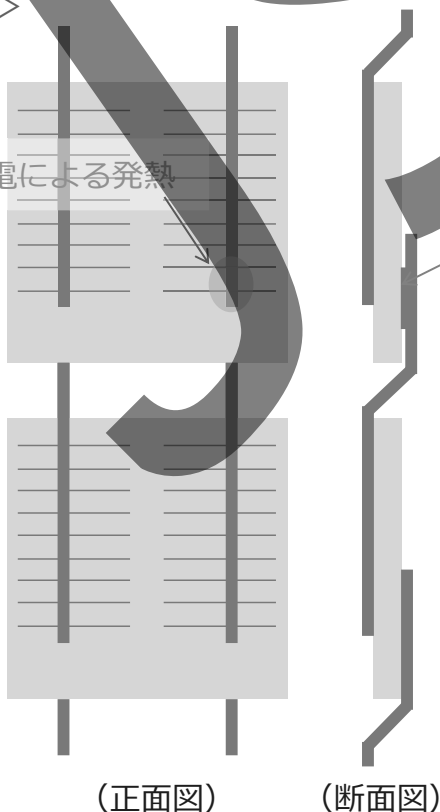
$R_{s_BC(L, R)}$: 裏面電極とタブ線の接触抵抗
 $R_{s_F\&T(L, R)}$: フィンガー電極&タブ線の抵抗
 R_{s_gap} : フィンガー電極間の抵抗
 : 電子の流れ



セルの裏面側でタブ線の片側が「微妙に」導通不備になると、、、

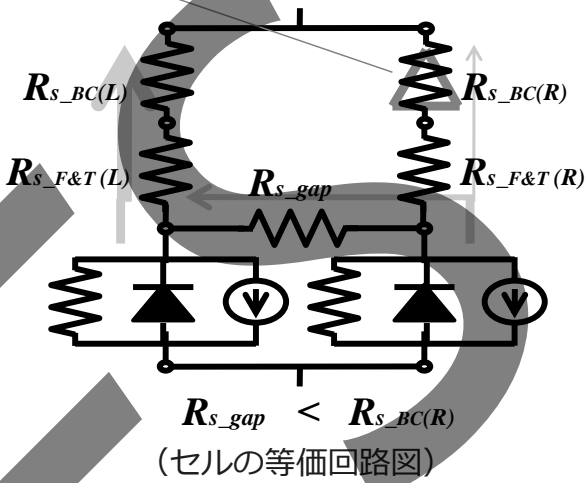
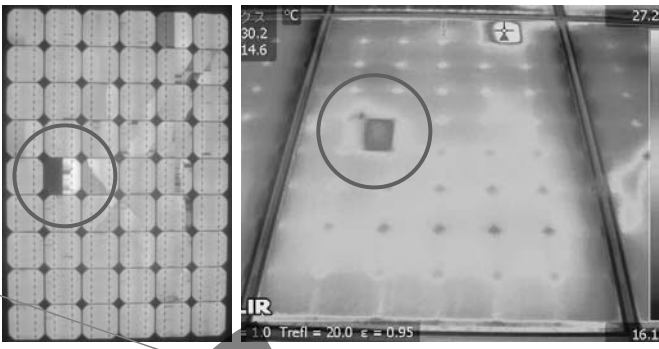
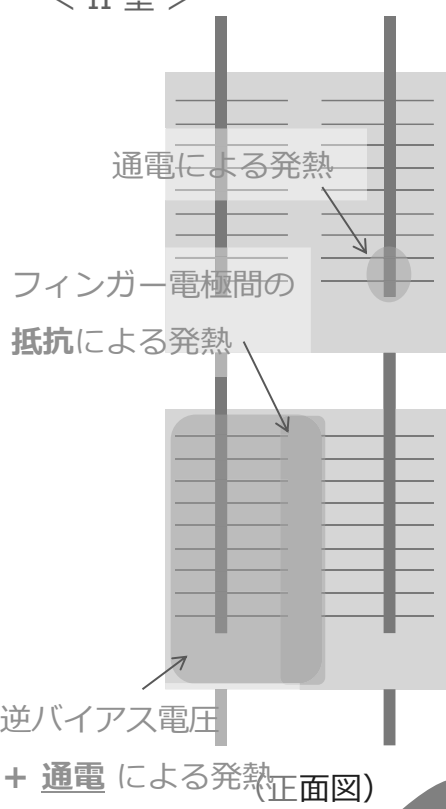
< I 型 >

通電による発熱



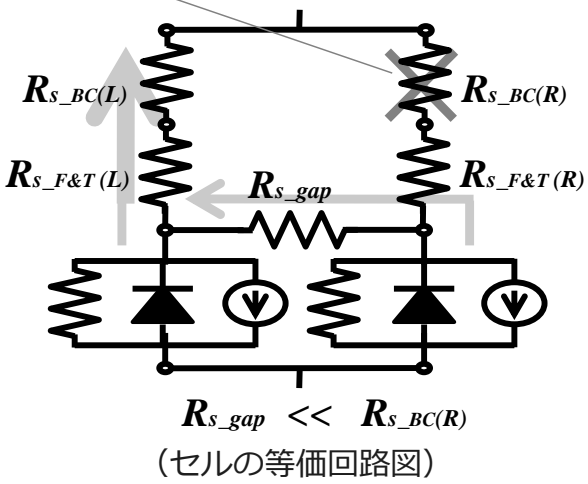
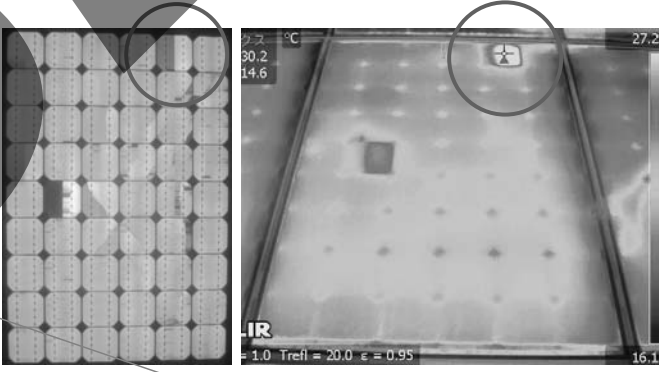
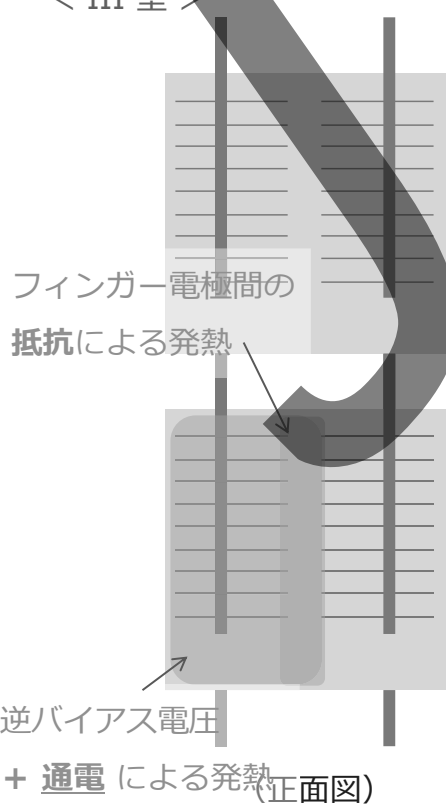
セルの裏面側でタブ線の片側が「顕著に」導通不備になると、、、

< II 型 >



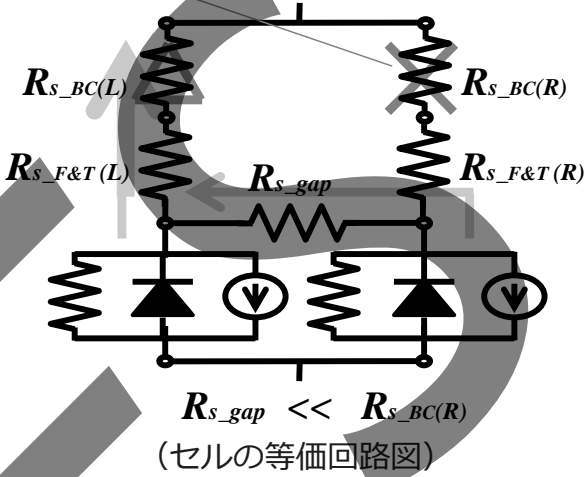
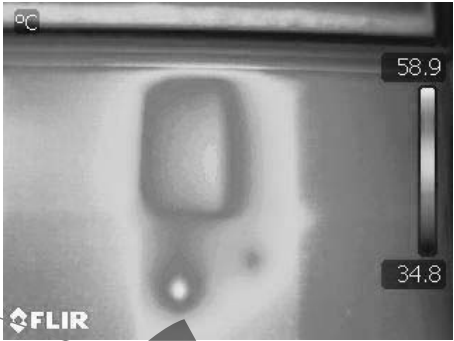
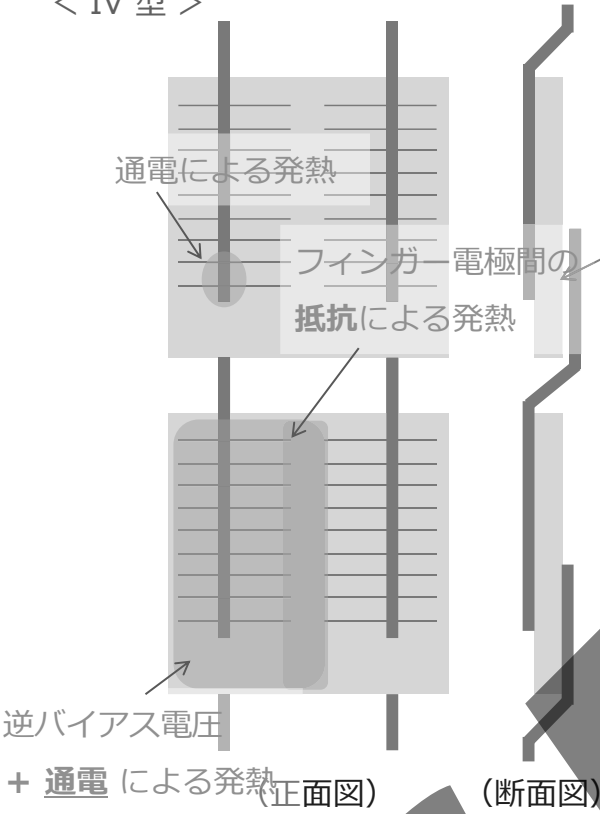
セルの裏面側でタブ線の片側が「ほぼ完全に」導通不備になると、、、

< III 型 >



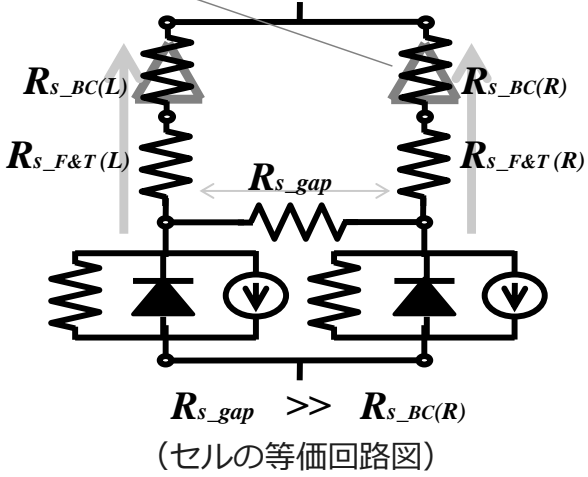
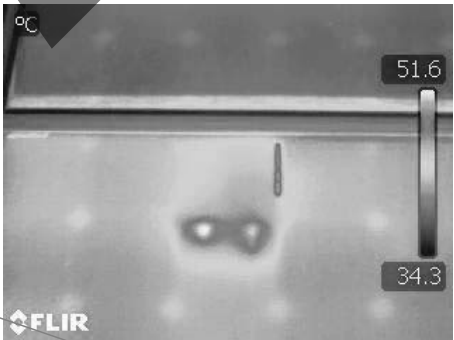
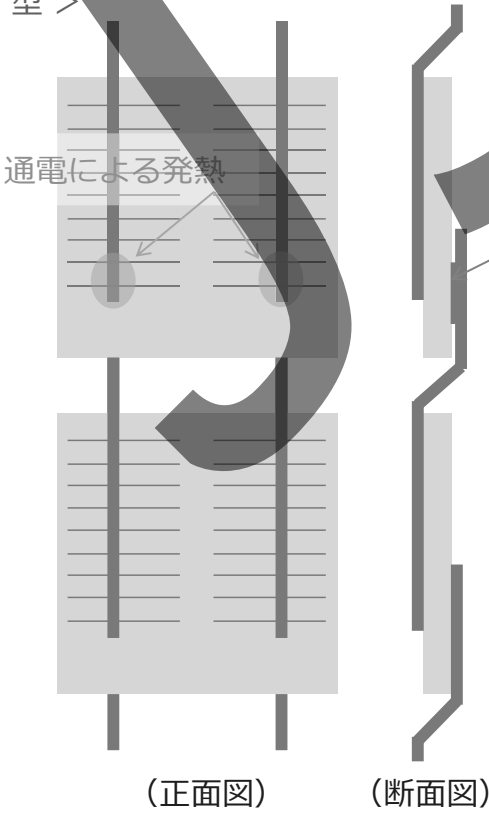
片側が「ほぼ完全に」、もう片側も「顕著に」導通不備になると、、、

< IV 型 >



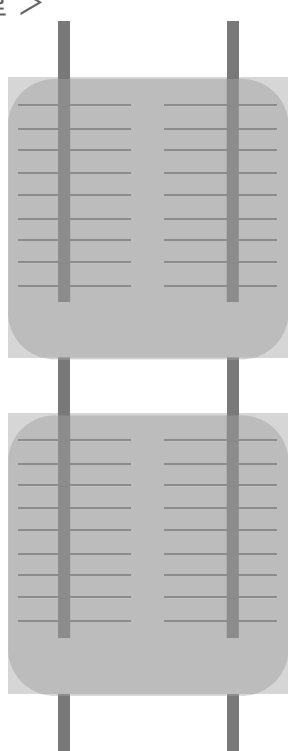
セルの裏面側でタブ線の両側が「顕著に」導通不備になると、、、

< V 型 >



セルの裏面側でタブ線の両側が「ほぼ完全に」導通不備になると、、、

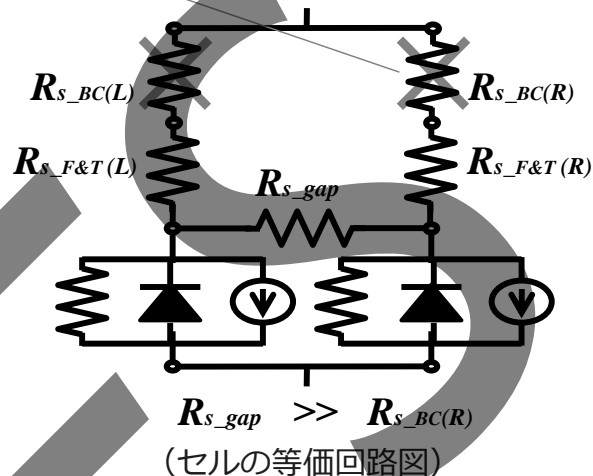
< VI 型 >



(正面図)

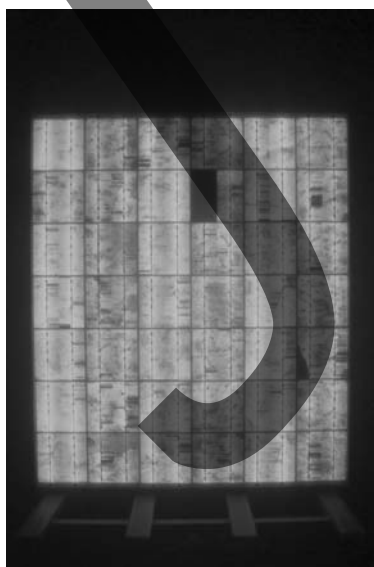


(断面図)

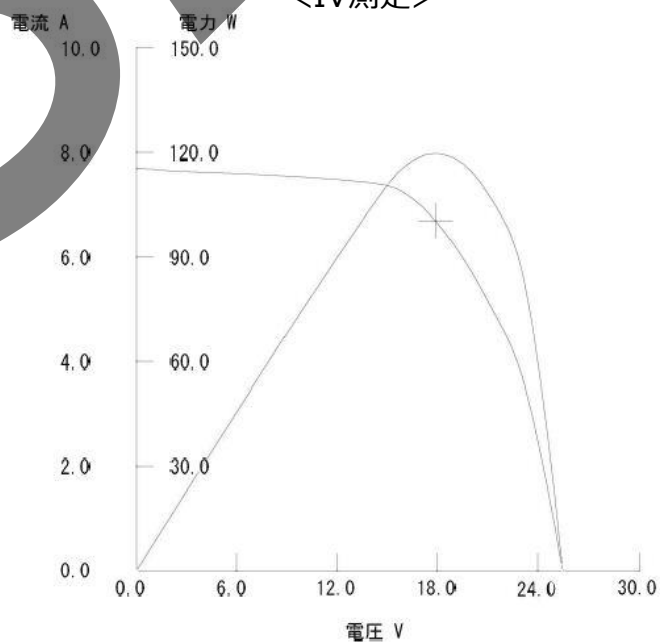


片側のタブ線が導通不備の場合のモジュールの出力低下について

<EL観察>



<IV測定>



- ・ 1か所につき動作電圧が最大で約2V減少します（中央のギャップの抵抗値が1Ω程度）
 = セルの動作電圧は1枚あたり0.5V程度なので、1か所につき最大で約4枚分の損失です
- ・ 損失分の定量性についてはモジュールの型式等により異なる（今後も詳細な調査が必要）

フィンガー電極が真ん中で切れているセル

- ・タブ線の導通不備箇所の検出
 - ○ : EL観察
 - ○ : 順電流印加によるサーモ観察
 - ○ : 発電時のサーモ観察
- ・導通が不備な箇所の詳細な状況についてはまだ調査できていません
- ・1か所につき動作電圧が最大で約2V減少
 - 1か所につき最大で約4枚分のセル出力に相当する量の損失
 - 損失分の定量性についてはモジュールの型式等により異なる
 - 今後も詳細な調査が必要

正しいモジュール診断のための第6章（作成中）

ご静聴ありがとうございました