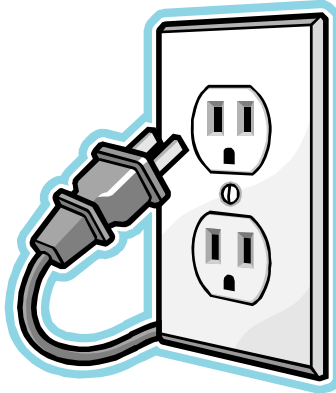


6.2 電源回路

電源回路の応用例

ACアダプター



コンセントAC電源
(トランス)



直流電源

ICカード

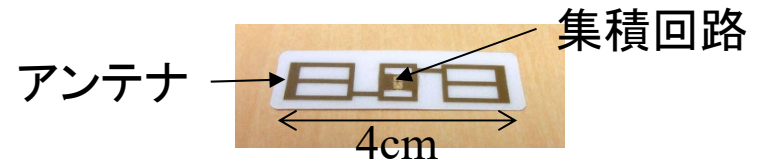


高周波磁界(13.56MHz)
(電磁誘導コイル)



直流電源(内部回路用)

ICタグ (RF-IDタグ)



ICカードとICタグは、無線通信距離とサイズが異なる以外は、ほぼ同じと考えてよい。

電磁波(920MHz/2.4GHz)
(アンテナ)

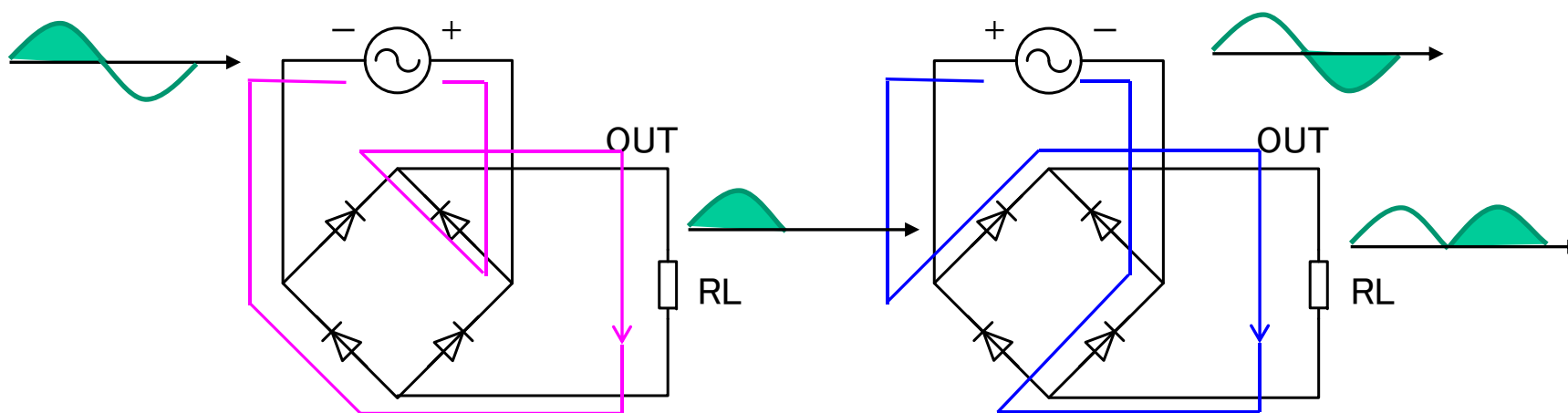


直流電源(内部回路用)

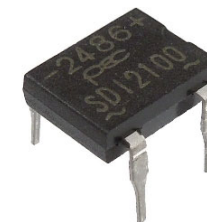
電源回路は昔に完成された技術だが、近年は、バッテリーレス集積回路、無線給電(電気自動車、スマートホン充電器、静止衛星発電)、環境エネルギー発電などの、高周波～マイクロ波帯を用いる最先端技術として再開発が進んでいる。

整流回路(ダイオードブリッジ)

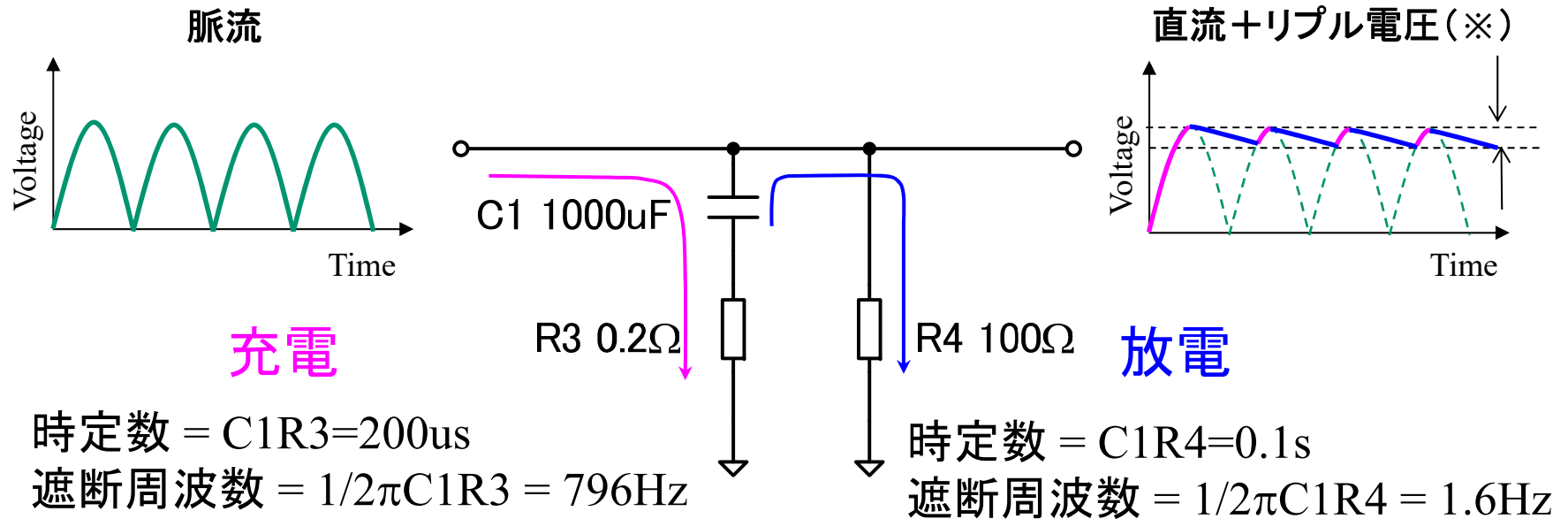
交流から直流を作るために使用される。OUTの電圧は波打っているのが脈流と呼ばれるが、LPFで平均(平滑とも呼ぶ)して直流電圧にする。



ダイオードブリッジは4本のダイオードを組み合わせ
て作ってもよいが、1パッケージにモールドされた4端
子の部品が市販されている。



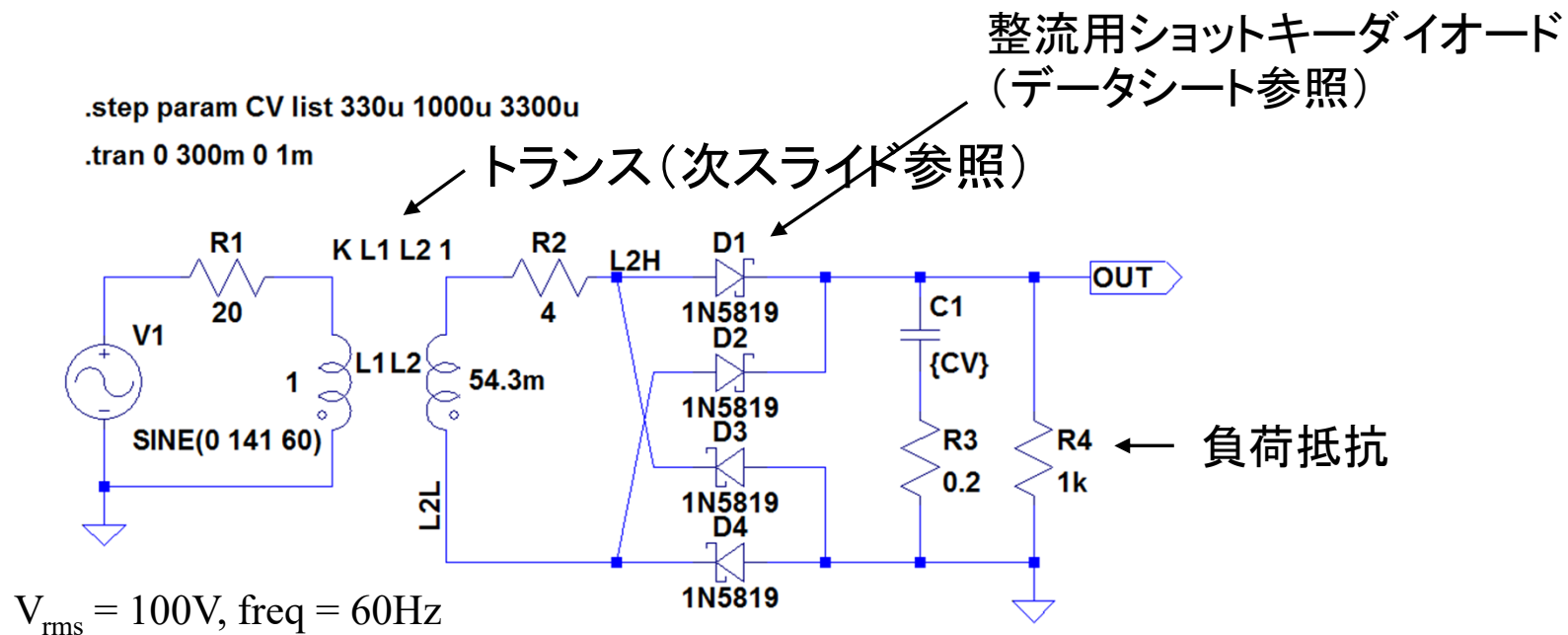
平滑回路



充電は、60Hzより高速に行われるが、放電は1.6Hz \ll 60Hzとなり、ゆっくり電圧が下がるので、脈流が平滑化される。

※ 出力電圧は、完全な直流ではなく少し波打っている。これをなくすためには、レギュレータ(後述)が必要。

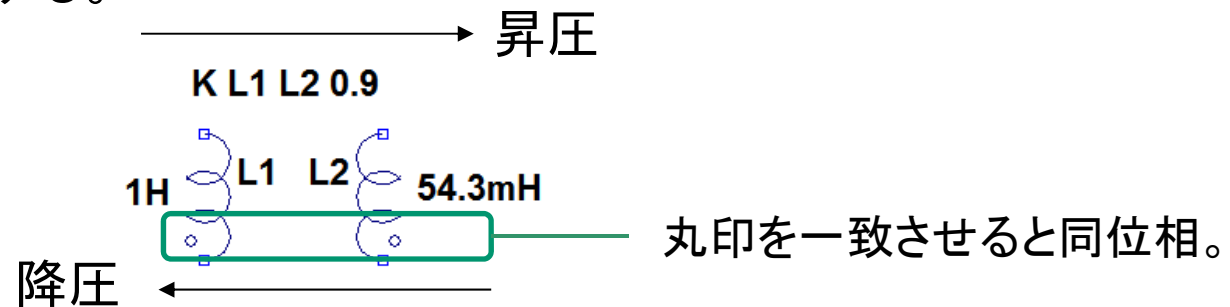
整流回路



1. 1N5819のデータシートに記載されているAverage Forward Currentの絶対最大定格を越えていないことを確認せよ
2. C1およびR4を変化させたとき、V(OUT)の平均電圧およびリップル電圧がどう変化するか調べよ

LTspiceへのトランスの入力方法

トランス(Transformer または変圧器)は2個のインダクタのトロイダル電磁誘導結合を利用して、交流電圧振幅を変換するデバイス。LTspiceでは、下記のように入力する。

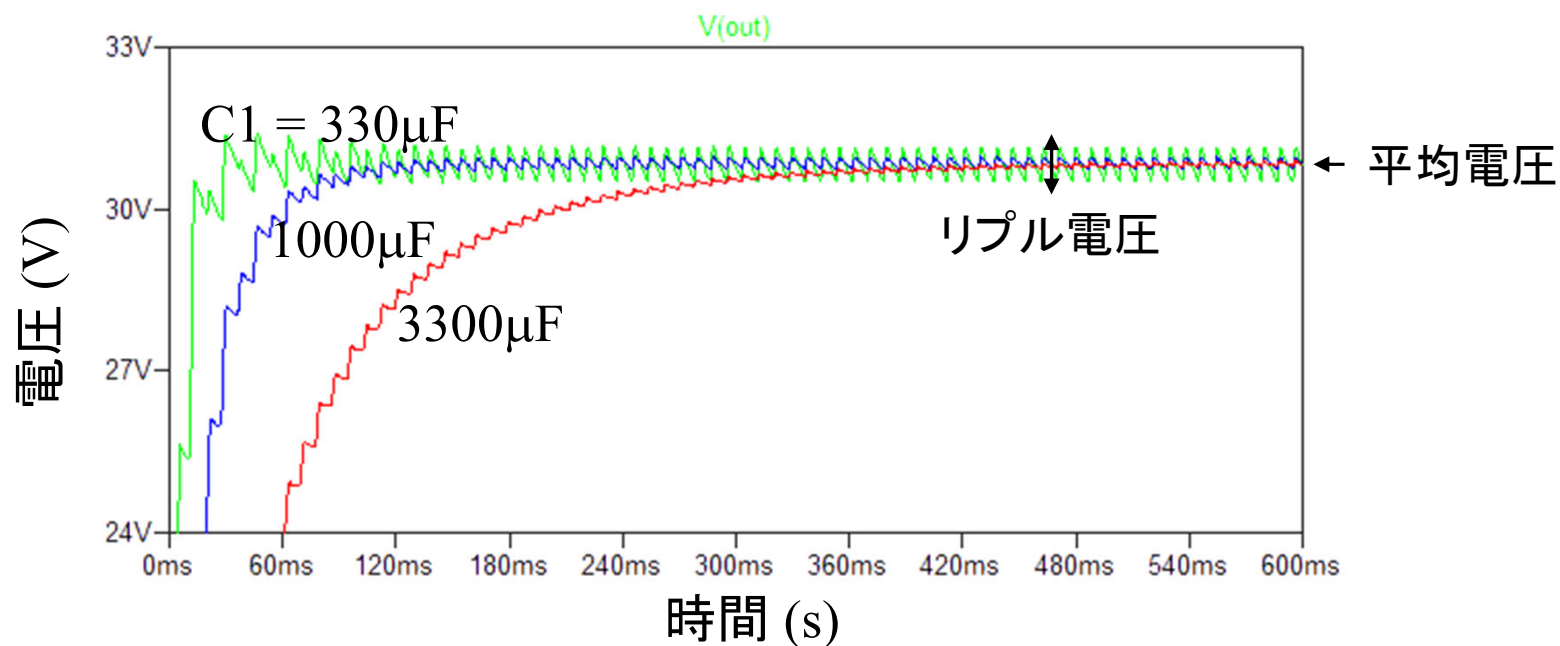


1. ind2 (インダクタンス)を必要個数配置
 - 丸印の向きを一致させると同位相、一致させないと逆位相に変換される
2. 両インダクタの自己インダクタンスを設定
 - 自己インダクタンス比が電圧比の目安になるが、負荷にも依存する
3. .opボタンをクリックし、K L1 L2 0.9 のように、結合させるインダクタと結合度を設定
 - 結合度は、1が理想値。実際には1よりもやや低くなる

素子定数の設定

- R1, R2は、トランスのデータシートに基づきインダクタの配線抵抗をモデル化したもので、実際の回路に抵抗を取り付ける必要はない
- トランスの自己インダクタンスL1, L2は、トランスのデータシートから算出(意味を理解するためには電磁気学の知識が必要)
- R3は、ダイオードに大きな電流が流れすぎて破損しないように、電流を制限している
- R4は、**負荷抵抗(Load resistance)**
 - **重要**: 負荷抵抗は電力を受け取る回路の代用として付けてある。平滑回路は、出力に接続した後段回路の影響を受けるため、接続する回路を想定して、負荷抵抗または負荷インピーダンスを出力に付けてシミュレーションしなければならない。

シミュレーション結果



リップル電圧: 出力は完全な直流ではなく多少波打つ。この交流成分の振幅をPeak-to-peakで表した値をリップル電圧という。リップルは、雑音源になるため、電圧を一定にするレギュレータ回路(後述)を追加する。

課題6. 2. 1

- スライド5の電源回路について、負荷抵抗を 100Ω , $1k\Omega$, $10k\Omega$, $100k\Omega$ に変えたとき、平均電圧とリップル電圧が何Vになるか調べよ。

チャージポンプ

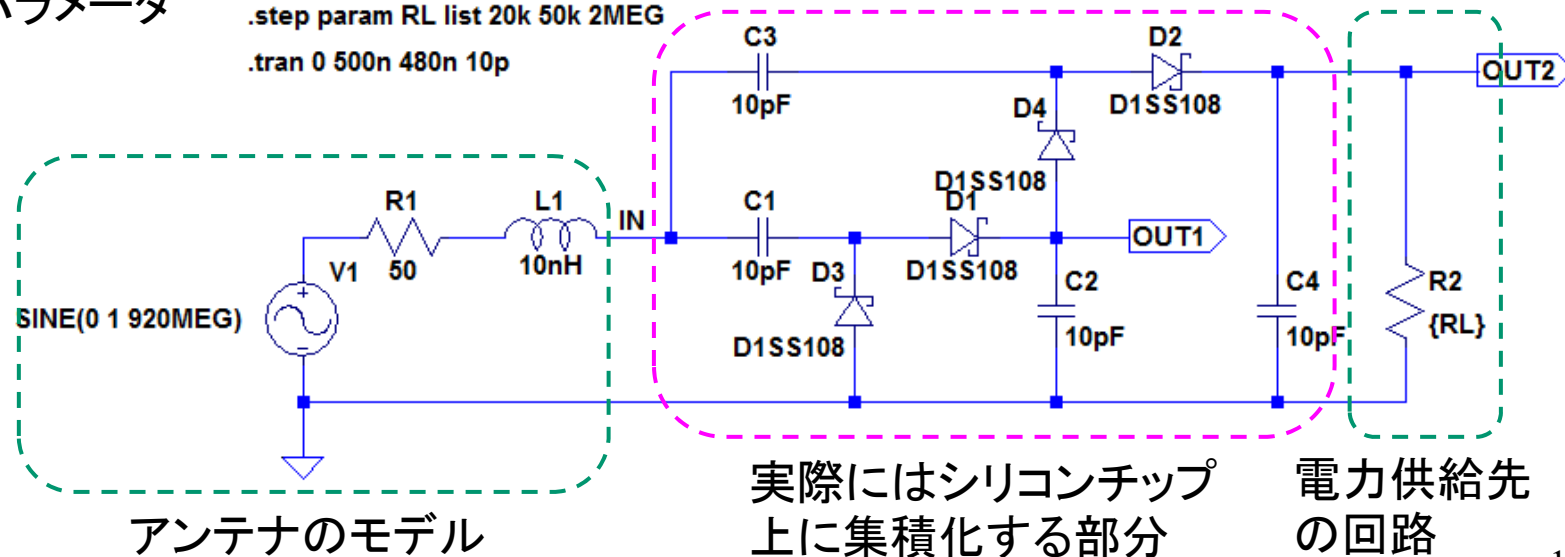
UHF帯ICタグに内蔵されているRF-DCコンバータ(※)を市販ディスクリートデバイスで再現してみる。IN, OUT1, OUT2の波形を調べ、それぞれ直流電圧成分が何Vか調べてみよう。

※ 無線通信で使用される周波数帯の交流電力から直流を作る回路。

ダイオード
のモデル
パラメータ

```
*1SS108 Hitachi Si SBD General Detector & High speed SW  
.model d1ss108 D(IS=4.86E-5 N=2.105 RS=58.7 CJO=1.62pf VJ=2.267 M=0.2857  
+ TT=.1ns BV=60 IBV=100E-15)
```

```
.step param RL list 20k 50k 2MEG  
.tran 0 500n 480n 10p
```



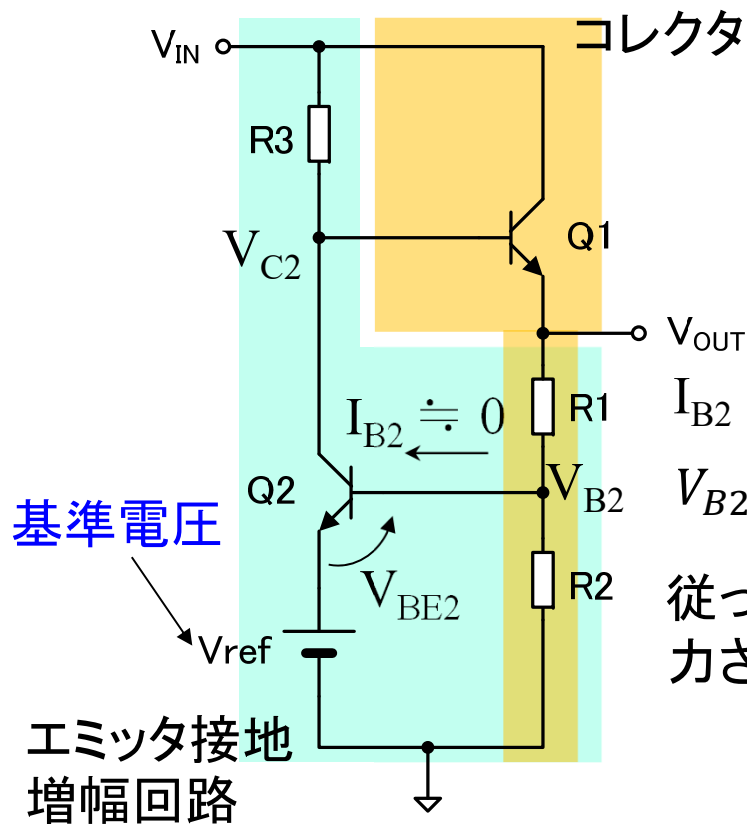
アンテナのモデル

実際にはシリコンチップ
上に集積化する部分

電力供給先の
回路

シリーズレギュレータ

電圧を一定に保つ安定化回路(レギュレータ)には、シリーズレギュレータとスイッチングレギュレータがある。ここでは、増幅回路の応用としてシリーズレギュレータの原理回路を設計してみよう。



- ① V_{OUT} が上昇
- ② V_{B2} が上昇
- ③ Q2により増幅され V_{C2} が減少
- ④ Q1により増幅され V_{OUT} が減少

$I_{B2} \doteq 0$ のとき

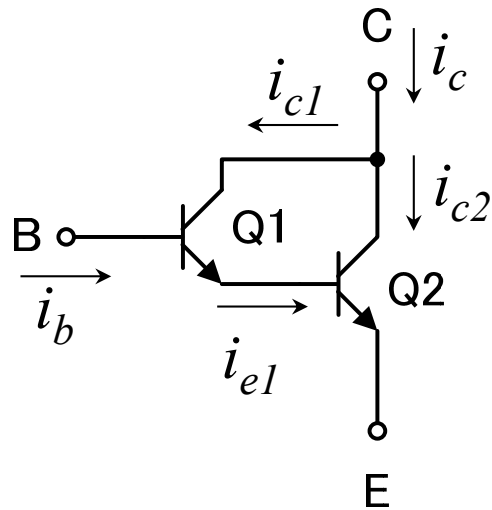
$$V_{B2} = \frac{R2}{R1 + R2} V_{OUT} = V_{ref} + V_{BE2} \cong V_{ref} + V_{B'E2}$$

従って、 V_{IN} および I_{OUT} に関係のない電圧 V_{OUT} が出力される。

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) (V_{ref} + V_{B'E2})$$

ダーリントントランジスタ (Darlington transistor)

2個のトランジスタを組み合わせ、高電流増幅率トランジスタにしたものを指す。この接続法は、ダーリントン接続と呼ばれる。



$$\begin{cases} i_{c1} = h_{fe1} i_b \\ i_{c2} = h_{fe2} i_{e1} \\ i_{e1} = (h_{fe1} + 1) i_b \end{cases}$$

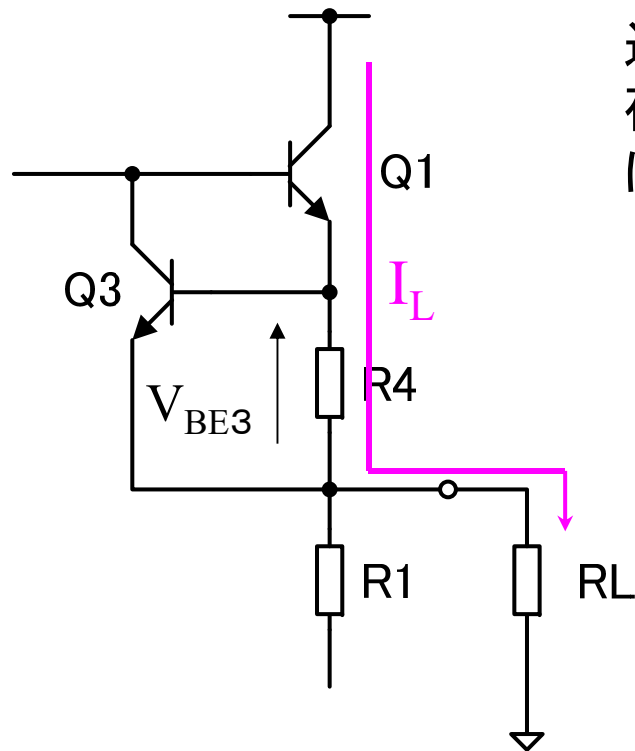
$$i_c = i_{c1} + i_{c2} = h_{fe1} i_b + h_{fe2} (h_{fe1} + 1) i_b$$

トランジスタQ1, Q2の合計の h_{fe_d} は、

$$h_{fe_d} = h_{fe1} + h_{fe2} + h_{fe1} h_{fe2}$$

ex) $h_{fe1} = 100, h_{fe2} = 100$ の場合、 $h_{fe_d} = 10200$

過電流に対する保護回路



過電流が流れると、トランジスタQ1または負荷RLが破損する可能性がある場合、R4, Q3により、電流を遮断する。

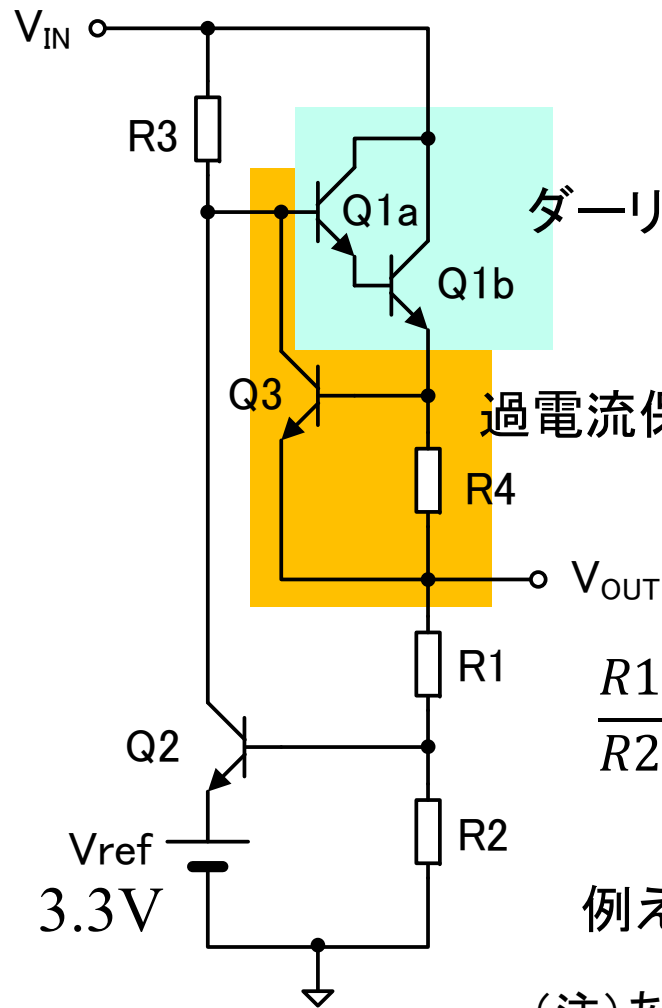
- ① I_L が規定値を超える
- ② $V_{BE3} > 0,6V$
- ③ トランジスタQ3 → ON
- ④ トランジスタQ4 → OFF
- ⑤ I_L が遮断される

$$V_{BE3} = R4 \cdot I_{L_max} \geq 0.6V$$

ex) $I_{L_max} = 50mA$ のとき
 $R4 = 0.6/50mA = 12\Omega$

改良版シリーズレギュレータ

$V_{OUT} = 5V$ 出力のシリーズレギュレータ
を設計してみる。



ダーリントランジスタ

過電流保護回路

スライド11より

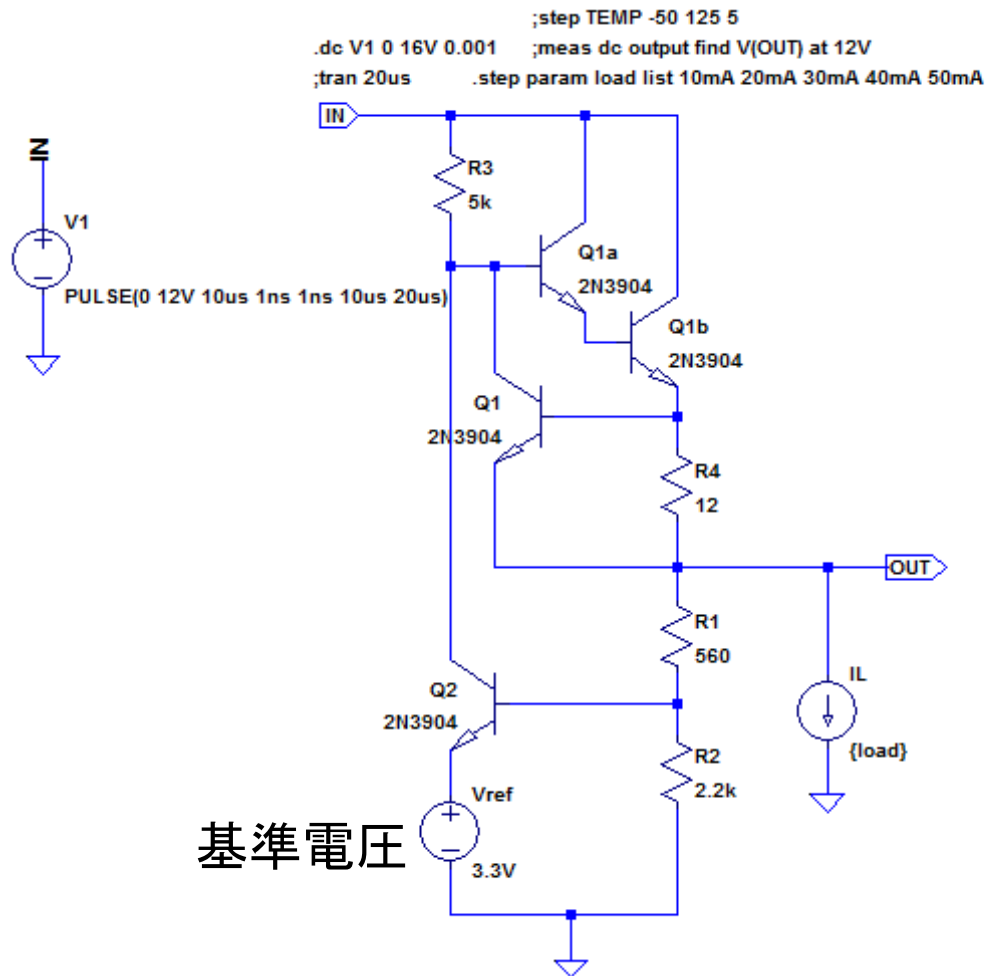
$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) (V_{ref} + V_{B'E2})$$

$$\frac{R1}{R2} = \frac{V_{OUT}}{V_{ref} + V_{B'E2}} - 1 = \frac{5V}{3.3V + 0.6V} - 1 = 0.282$$

例えば、 $\frac{R1}{R2} = \frac{620\Omega}{2.2k\Omega} = 0.282$

(注)あまり高抵抗にすると、 $I_{B2} \approx 0$ が成り立たない。 14

シーリズレギュレータのシミュレーション

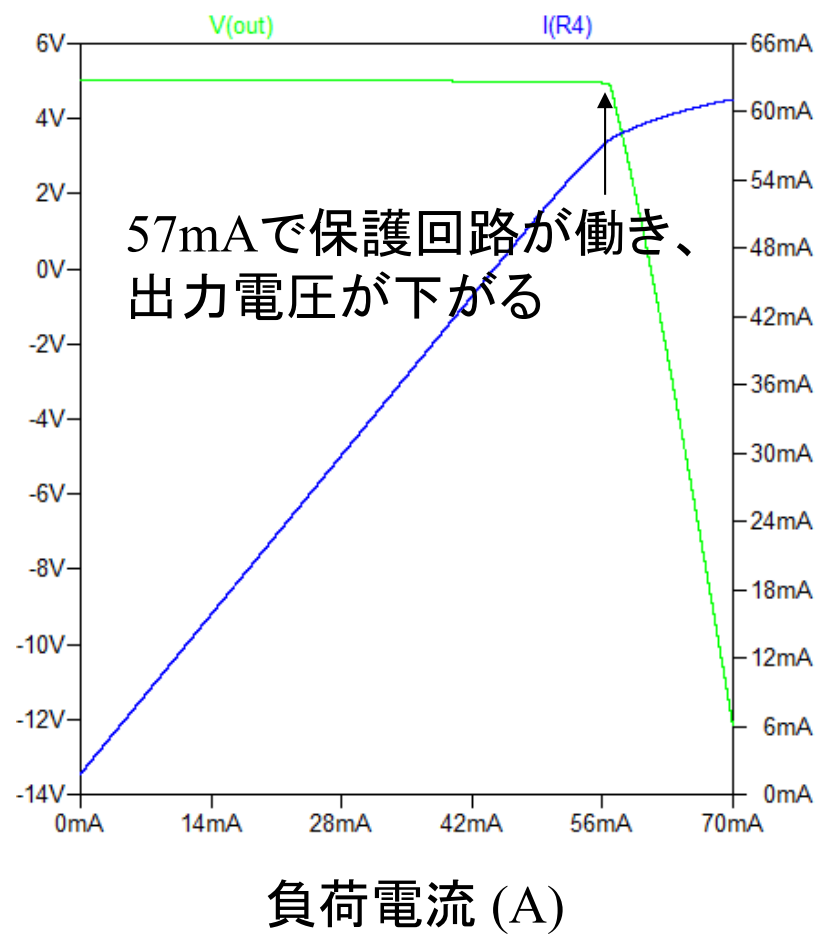
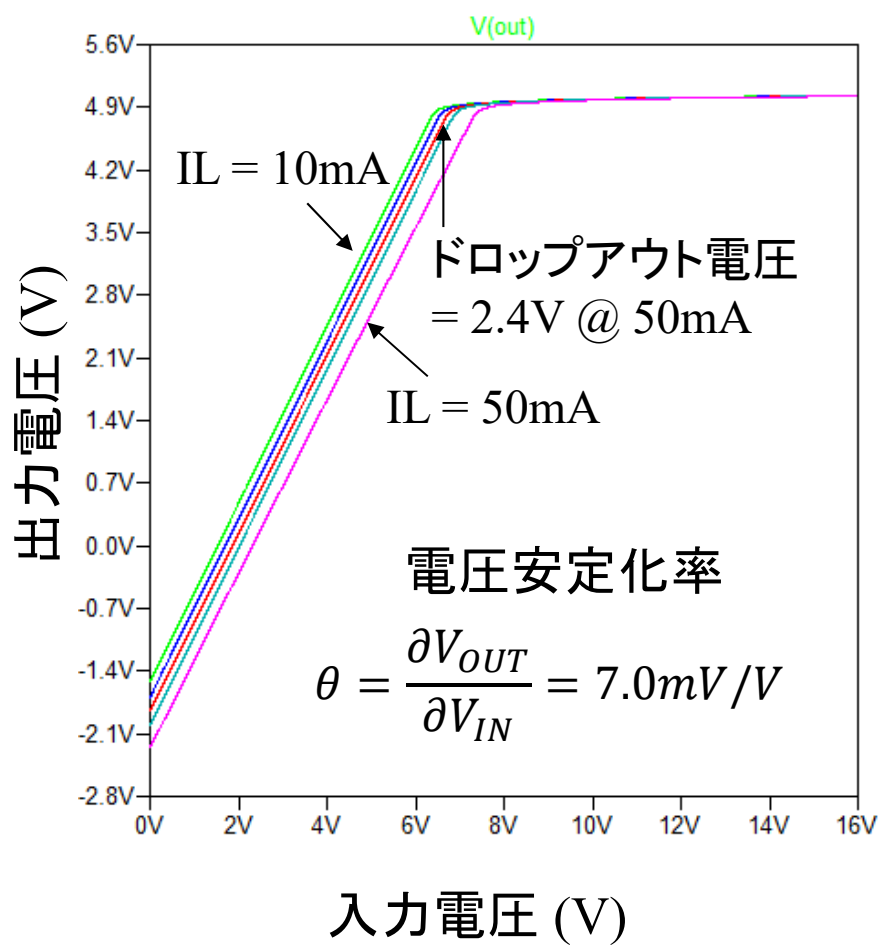


(参考) この回路は、温度変化に弱い。このため、実際のシーリズレギュレータは、Q2のエミッタ接地増幅回路の代わりに、差動増幅回路が使用される。差動増幅回路は、温度ドリフトが同相入力電圧として相殺されるため、トランジスタの温度依存性が現れない。

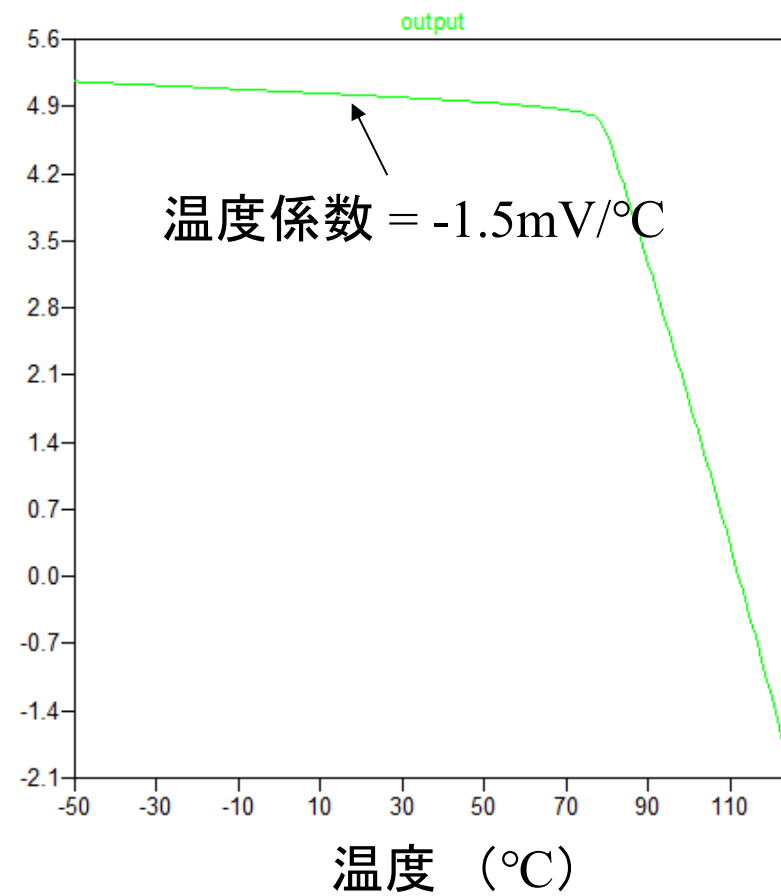
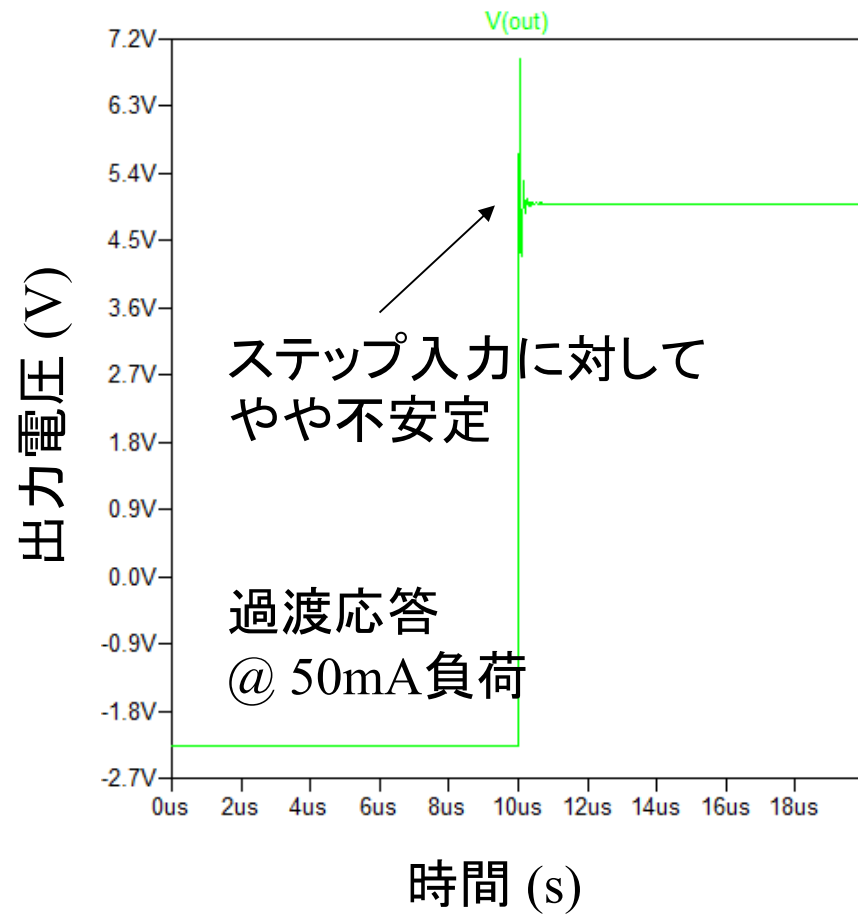
レギュレータの性能

- 電圧安定化率
 - 出力電圧変化/入力電圧変化
- ドロップアウト電圧
 - 最小の入力-出力電圧差
- 出力抵抗
- 温度係数

シミュレーション結果(1)



シミュレーション結果(2)



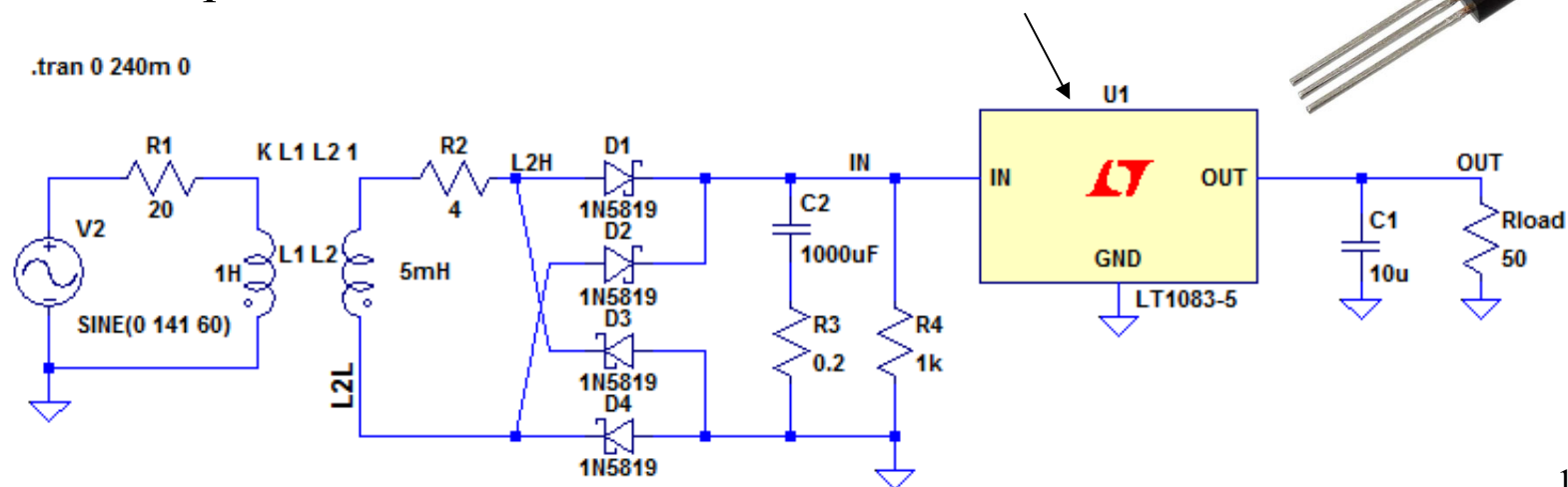
リニア電源回路

スライド5の整流回路とシリーズレギュレータを接続したものは、**リニア電源**と呼ばれている。他方式の電源回路よりも消費電力および発熱が大きくなるが、雑音が少ないため、計測器や医療機器の電源として必要。シリーズレギュレータは、IC化されたものが3端子レギュレータまたはLDO(※次スライド)の名称で販売されている。

標準ライブラリの5V固定電圧 LDO

Component → Power Products → LT1083-5

3端子レギュレータ




(参考)LDO (Low Dropout Regulator)

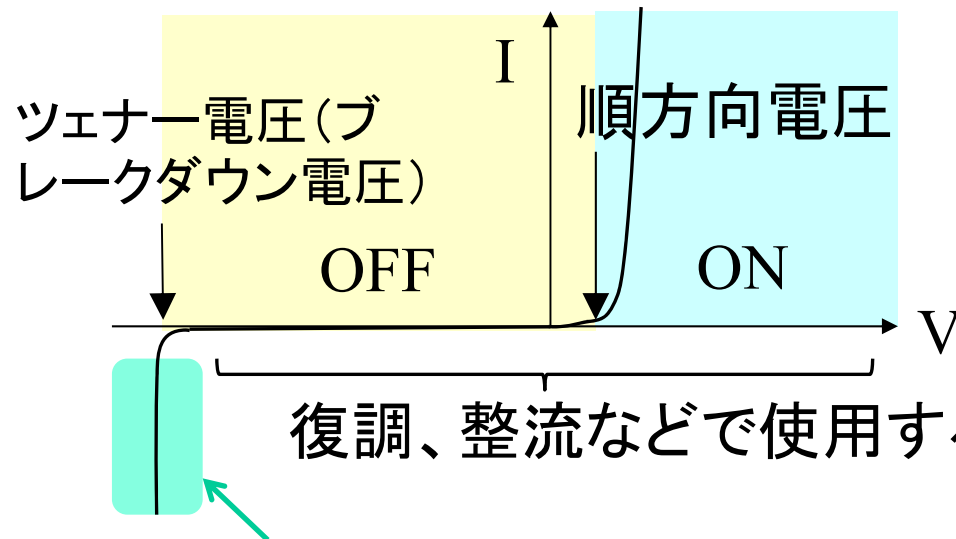
- レギュレータ自体の消費電力は、負荷電流・ドロップアウト電圧で表される
- 市販されているシリースレギュレータの中で、ドロップアウト電圧が1V程度より低いシリースレギュレータはLDOという名称で販売されている
 - 本節で、シミュレーションを行った従来方式の回路では、スライド11のQ1がエミッタフォロワになっているため、最低1.2~1.4V程度のドロップアウト電圧が必要となる。一方、LDOは、エミッタフォロワを使用しないように工夫されている。
- 近年では、より低消費電力で小型なレギュレータ方式として、スイッチングレギュレータが主流になっている
 - 近年のモバイル電子機器は大抵スイッチング電源が使われている。
 - ただし、スイッチングレギュレータは高周波雑音を発生するため使えない分野もある

課題6. 2. 2

1. スライド18のリニア電源のシミュレーションを行い、下記の性能を調べよ
 - レギュレータ入力の平均電圧とリップル電圧
 - レギュレータ出力の平均電圧とリップル電圧
 - トランスの2次側(5mHの側)のピーク電圧
2. V(OUT)の室温付近での温度係数は何V/°Cか
 - 温度係数はスライド15の回路よりも改善されているか

ツェナーダイオードの特性

Symbol 



基準電圧(Voltage reference):
電源電圧や温度に依存しない電圧。電圧の測定、電圧制御、アナログ-デジタル変換などに必要。

電圧が一定に保たれているので、**簡易的な基準電圧として使用できる**※。ただし、電流が流れすぎると壊れるので、電流を制限する抵抗が必要。

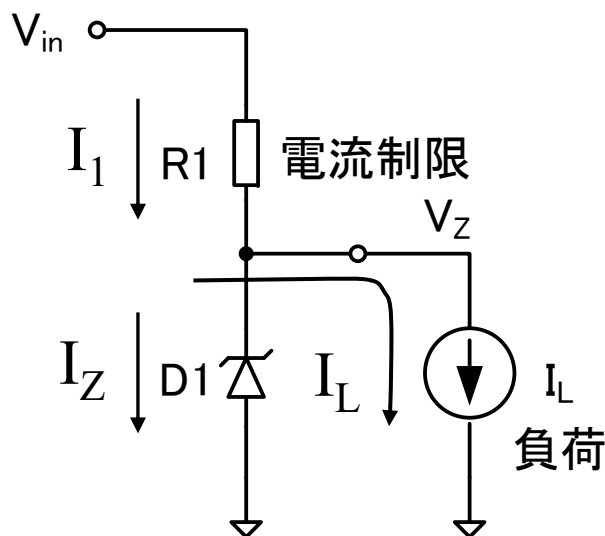
※ 定電圧ダイオード(Zener diode)という名称で、色々なツェナー電圧のデバイスがシリーズとして市販されている。簡便に定電圧源が作れるので多用されているが、雑音が多いことと、ツェナー電圧の製造ばらつきが大きい問題がある。

基準電圧回路の設計(1)

1. Data SheetよりRDシリーズの絶対最大定格を確認。破損を防ぐためには、消費電力(定常的な電力)とサージ(瞬間的な電力)が重要だが、まずは定常状態で正しく動作させるために、最大消費電力を調べる
 - $P_{\max} = 500\text{mW}$
2. RD6.8E B2(モデル名はDZ6_8)の、Zener Voltageを調べる
 - $V_Z = 6.52\sim 6.79\text{V}$ (平均 6.66V) @ 20mA
3. 制限電流を求める
 - $I_{\max} = P_{\max}/V_{Z_{\max}} = 500\text{mW}/6.79\text{V} = 73.6\text{mA}$
 - 70%の設計マージン(余裕)をとると、ダイオードに流せる電流 $I_Z =$ 約 22mA

(参考) 電源回路のように常時動作し、高い信頼性が要求される回路では設計マージンは大きめにしておく。

基準電圧回路の設計(2)



I_1 は、基準電圧を受け取る回路に流れ込む電流をモデル化した負荷電流源である。ここでは、1mA程度流れることを想定する。負荷電流源の代わりに1mA程度を流す負荷抵抗(6.7k Ω)を付けてもよい。

$$I_Z = 22\text{mA} \quad (\text{前ページより})$$

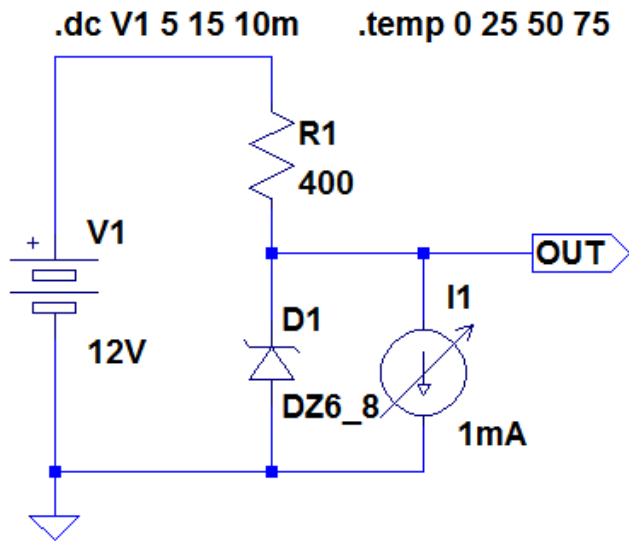
$$I_1 = I_Z + I_L = 23\text{mA}$$

$$V_{in} = R1 \cdot I_1 + V_Z$$

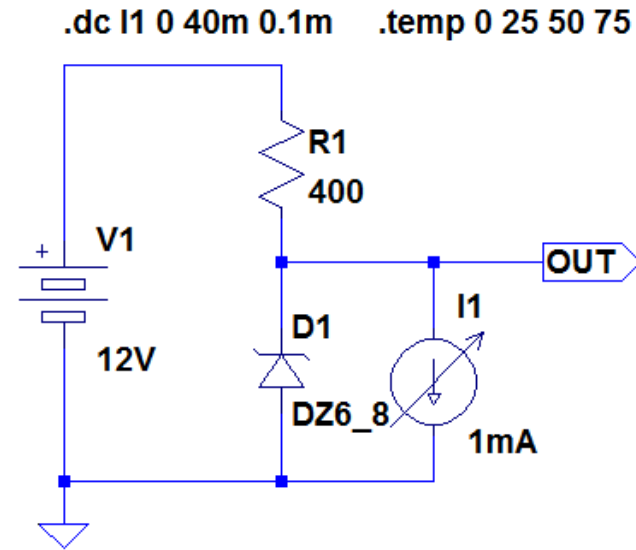
4. ここでは、 $V_{in} = 15\text{V}$ まで加えても故障しないように設計してみよう
 - 上記の式より $R1 = 363\Omega$ となるが、少し余裕をみて、 $R1 = 400\Omega$ としておく
5. $R1$ を付けたため、 V_{in} がある程度大きくないと定電圧回路として動作しないのでシミュレーションで、動作電圧範囲(下限)を調べておく必要がある
6. 出力電圧は、入力電圧だけでなく温度によっても変化するので、.opボタンで、.temp 0 25 50 75を追加し、0~75 $^{\circ}\text{C}$ の温度依存性も調べてみよう

基準電圧回路のシミュレーション

入力電圧依存性の解析



負荷電流依存性の解析



下記の 6.8V のツェナーダイオードのモデルを.op ボタンで回路図に追加すること。

```
.model dz6_8 D(IS=0.1f RS=.25 BV=6.8 Ibv=20u Nbv=.55 Ibv1=2.0m Nbv1=15  
+ Cjo=175pF Vj=.75 Fc=.5 Isr=1.86n M=.55 Tbv1=-20u)
```

'1' → '1'(エル)

課題6.2.3

定電圧回路の回路シミュレーション結果から以下の性能を求めて、表に記入せよ。単位を付け忘れないこと。温度の指定がない項目は、 $T = 25^{\circ}\text{C}$ でシミュレーションを行うこと。

項目	シミュレーション結果	測定条件
出力電圧		$V_{\text{in}} = 12\text{V}$, 負荷電流 = 1mA
最小入力電圧		$V_{\text{out}} = 6.85\text{V}$ 以上
最大入力電圧		$P_{\text{max}} = 500\text{mW}$ 以下
入力電圧変化に対する出力電圧変動	V ~ V	$V_{\text{in}} = 11\text{V} \sim 13\text{V}$
温度変化に対する出力電圧変動	V ~ V	$T = 0.0 \sim 75^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{in}} = 12\text{V}$
回路の消費電力(負荷の消費電力を除く)		$V_{\text{in}} = 12\text{V}$, 負荷電流 = 1mA

6.2節のまとめ

- 電源回路の構成要素
 - 整流回路またはチャージポンプ
 - 平滑回路
 - レギュレータ
 - 基準電圧回路
- 電源回路の出力は、直流電圧にリップル電圧が加わっている
 - 負荷抵抗が小さくなると(または負荷電流が大きくなると)、リップル電圧が大きくなる
 - リプルを除去するために、平滑回路とレギュレータが併用される
- レギュレータにはシリーズレギュレータとスイッチングレギュレータがある
- レギュレータの性能指標
 - 電圧安定化率、ドロップアウト電圧、出力抵抗、温度係数など
- 基準電圧回路は、電源電圧や温度に依存しない一定の電圧を出力することができる