

SuperKEKB 加速器 KPS の Crowbar 回路

吉本 伸一

2024 年 11 月 8 日

目次

第 1 章	SuperKEKB のクライストロン電源	3
1.1	SuperKEKB の RF システムの概要	3
第 2 章	クローバー短絡試験	4
2.1	オシロの測定系について	4
2.2	短絡試験の等価回路	5
2.3	電源からの注入エネルギー	5
2.4	クローバー動作前	8
2.5	クローバー動作以降	9
第 3 章	測定データの解析	11
3.1	physics2 練習帳	12

第1章 SuperKEKB のクライストロン電源

1.1 SuperKEKB の RF システムの概要

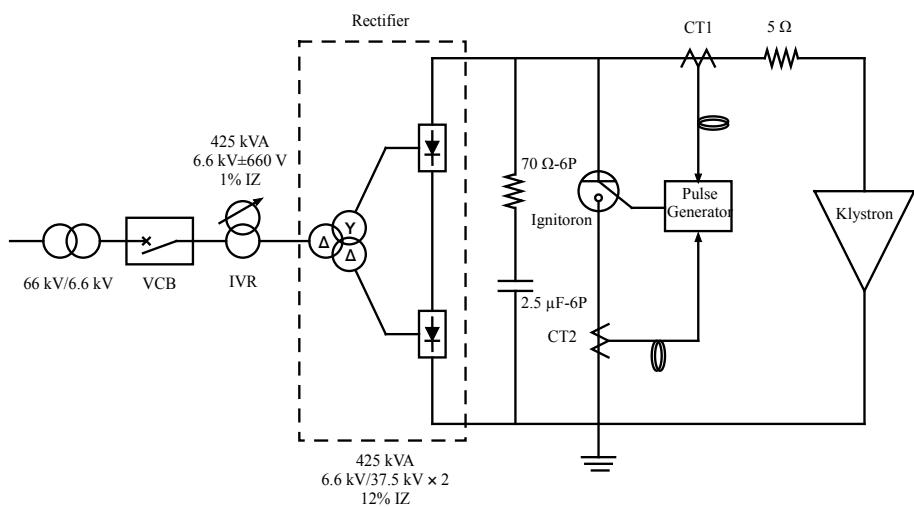


図 1.1 クローバー回路.

第2章 クローバー短絡試験

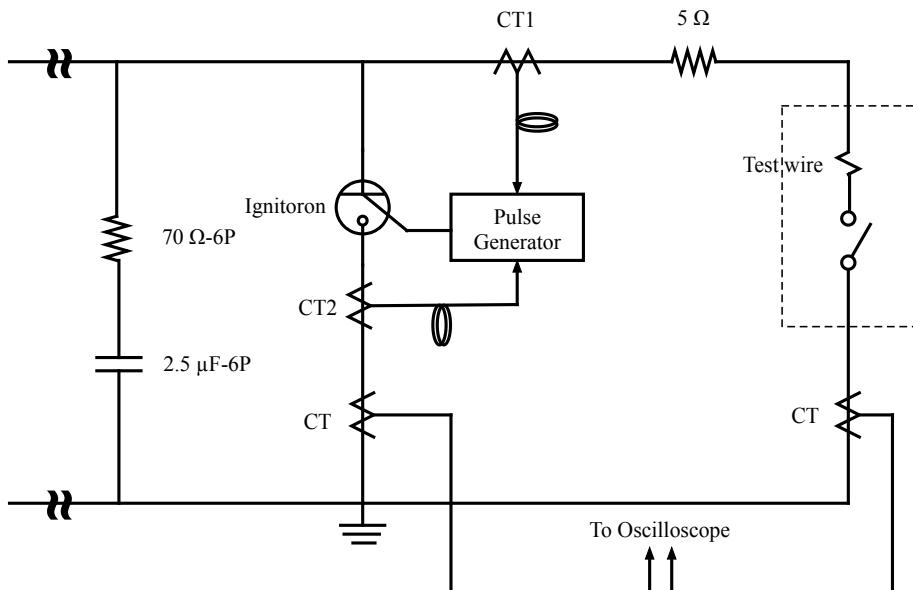


図 2.1 短絡試験時のセットアップ.

クローバー回路の健全性を確認するため、毎年夏のメンテナンス時に短絡試験を行なっている。(図 2.1) が短絡試験を行う時のセットアップである。短絡電流とクローバー電流を測定する為に CT(PEARSON™ CURRENT MONITOR MODEL 3025) を使用している。テストワイヤー(0.35 ϕ , 200 mm の銅線)と短絡のためのギャップは安全の為、短絡試験器の中に収めてる。(図 2.2)

2.1 オシロの測定系について

短絡電流とクローバー電流の測定に使用しているピアソンの CT の出力は 0.025 V/A、つまり 40 A/V となる。このままでは電圧が大きすぎるので、10 dB のアッテネーターを入れて 1/10 にしている。また、CT の出力インピーダンスを R_o とし、オシロの入力インピーダンスを R_i とするとき、オシロで測定する電圧 V_m は CT から送られる電圧 V とするとき

$$V_m = \frac{R_i}{(R_i + R_o)} V \quad (2.1)$$

となる。今オシロ側はインピーダンスマッチングするため 50 Ω のスルータイプのターミネーターで終端しているから $R_o = R_i = 50 \Omega$ となって $V_m = V/2$ となり、CT で測定された電圧 V はオシロで



図 2.2 短絡試験器 (左 : 全体, 右 : 短絡試験機内部の銅細線と短絡用ギャップ)

測定された電圧 V_m の 2 倍になる事に注意。したがって、測定結果は 800 A/V となる。

2.2 短絡試験の等価回路

2.3 電源からの注入エネルギー

まずは、クローバー動作時に電源から注入されるエネルギーを考える。

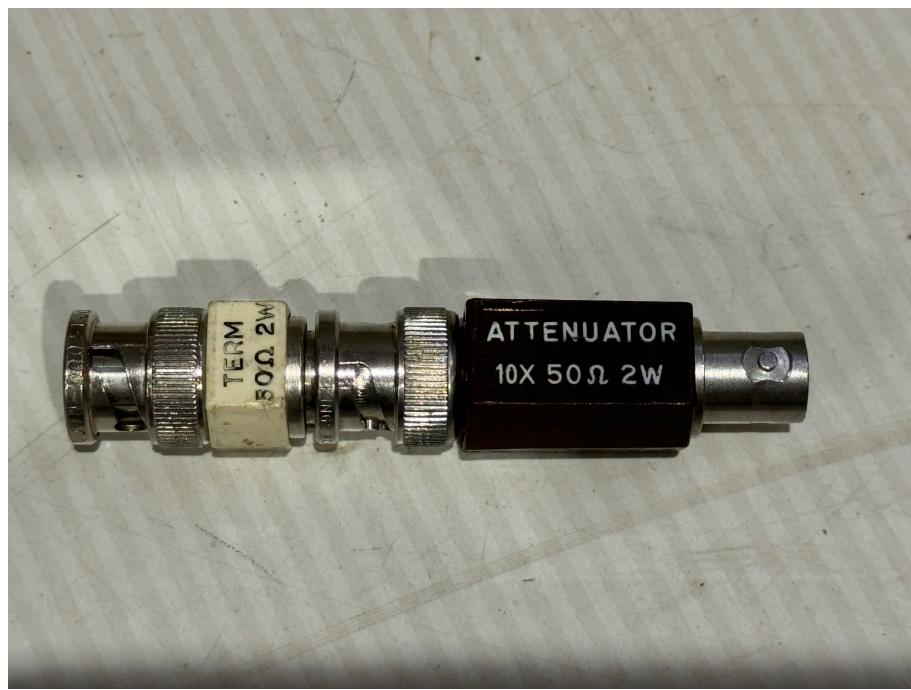


図 2.3 ターミネーターとアッテネーター.

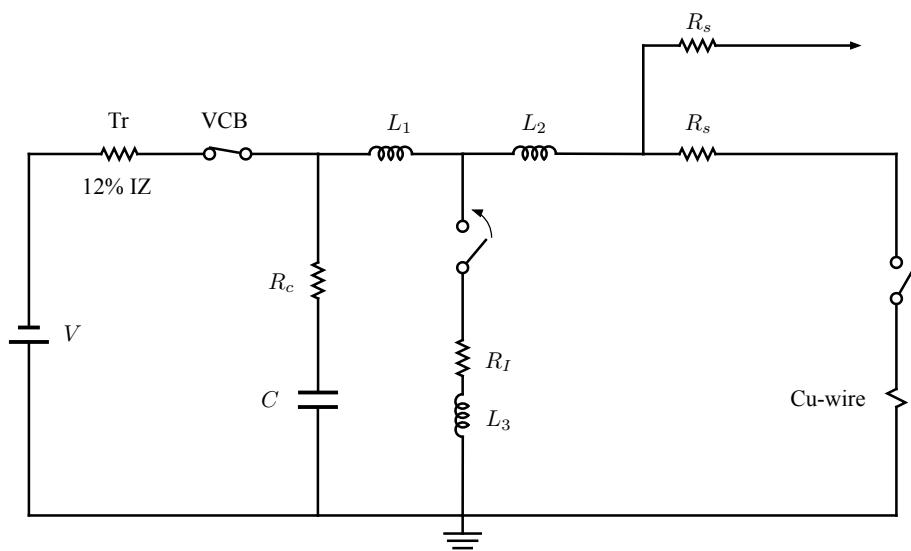


図 2.4 短絡試験時の等価回路.

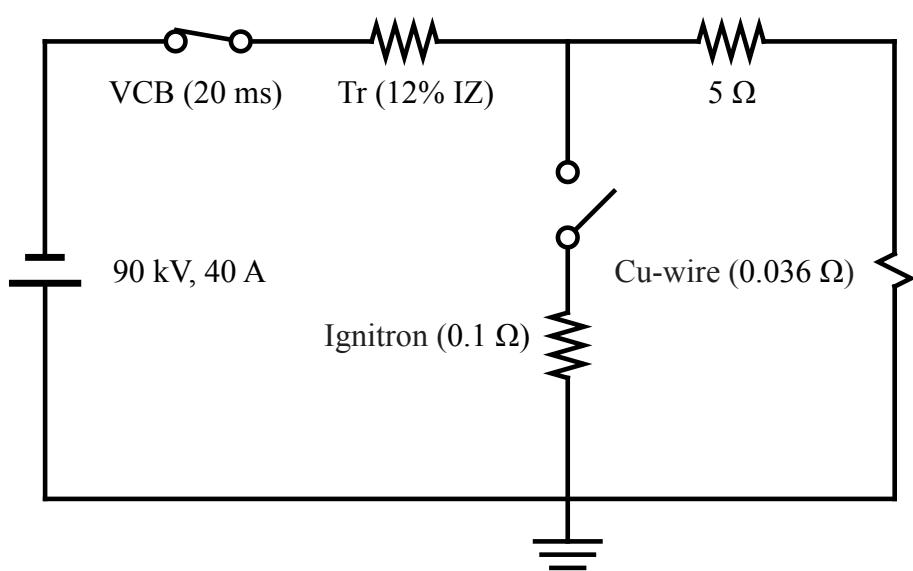


図 2.5 短絡試験時の等価回路.

2.4 クローバー動作前

クローバー動作前の等価回路は(図2.6)のようになる。

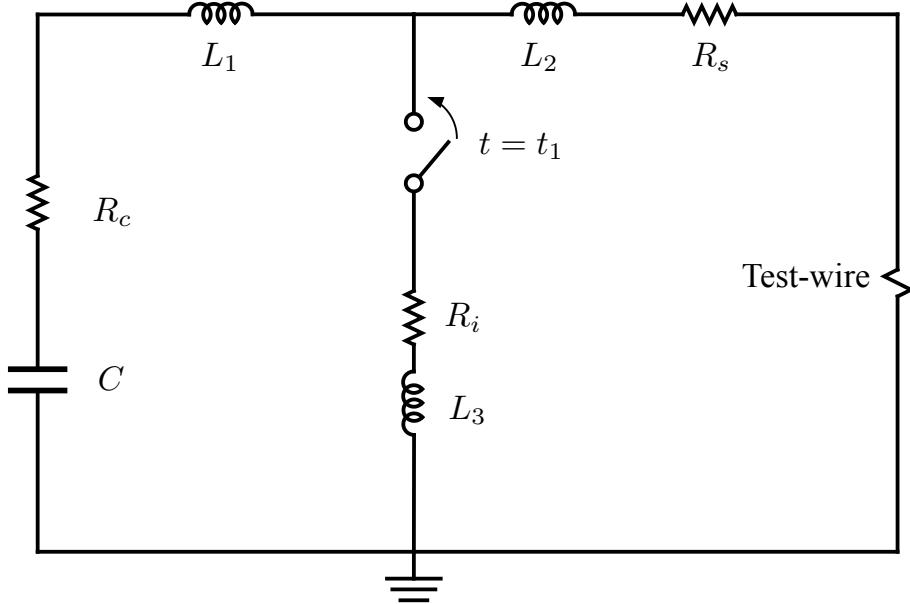


図2.6 クローバー動作前の等価回路.

この回路の微分方程式は

$$(L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} + (R_c + R_s)i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = 0 \quad (2.2)$$

両辺を時間 t で微分すると

$$(L_1 + L_2) \frac{d^2i(t)}{dt^2} + (R_c + R_s) \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0 \quad (2.3)$$

特性方程式

$$(L_1 + L_2)\lambda^2 + (R_c + R_s)\lambda + \frac{1}{C} = 0 \quad (2.4)$$

の判別式 D は

$$D = (R_c + R_s)^2 - \frac{4(L_1 + L_2)}{C} \quad (2.5)$$

ここで、 L は十分小さいので、 $D > 0$ となり (2.4) は異なる 2 つの実数解をもつ。その解を λ_1 と λ_2 とすると、微分方程式 (2.3) の一般解は A と B を定数として次のように書ける。

$$i(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (2.6)$$

初期条件 $t = 0$ で $i(0) = 0$ より

$$i(0) = A + B = 0 \quad (2.7)$$

$t = 0$ でコンデンサの電圧が V_0 とすると

$$(L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} \Big|_{t=0} = V_0 \quad (2.8)$$

これより、

$$A = -B = \frac{V_0}{(\lambda_1 - \lambda_2)(L_1 + L_2)} \quad (2.9)$$

したがって、回路に流れる電流は次のようになる。

$$i(t) = \frac{V_0}{(\lambda_1 - \lambda_2)(L_1 + L_2)} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \quad (2.10)$$

2.5 クローバー動作以降

クローバー動作以降の等価回路は (図 2.7) のようになる。この回路の左側のループを考えると、

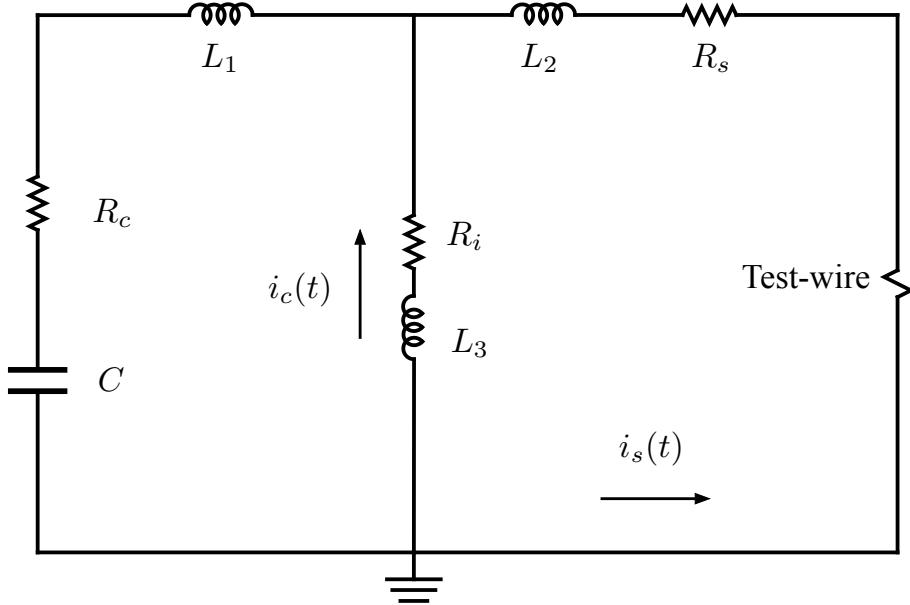


図 2.7 クローバー動作後の等価回路。

クローバー電流 $i_c(t)$ 微分方程式は

$$(L_1 + L_3) \frac{di_c(t)}{dt} + (R_c + R_i)i_c(t) + \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = 0 \quad (2.11)$$

両辺を時間 t で微分すると

$$(L_1 + L_3) \frac{d^2 i_c(t)}{dt^2} + (R_c + R_i) \frac{di_c(t)}{dt} + \frac{1}{C} i_c(t) = 0 \quad (2.12)$$

特性方程式

$$(L_1 + L_3)\lambda^2 + (R_c + R_i)\lambda + \frac{1}{C} = 0 \quad (2.13)$$

の判別式 D は

$$D = (R_c + R_i)^2 - \frac{4(L_1 + L_3)}{C} \quad (2.14)$$

ここで、 L は十分小さいので、 $D > 0$ となり (2.13) は異なる 2 つの実数解をもつ。その解を λ_1 と λ_2 とすると、微分方程式 (2.12) の一般解は A と B を定数として次のように書ける。

$$i_c(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad (2.15)$$

初期条件 $t = t_1$ で $i_c(t_1) = 0$ より

$$i_c(t_1) = Ae^{\lambda_1 T_1} + Be^{\lambda_2 t_2} = 0 \quad (2.16)$$

$t = t_1$ でコンデンサの電圧が V_1 とすると

$$(L_1 + L_3) \left. \frac{di_c(t)}{dt} \right|_{t=t_1} = V_1 \quad (2.17)$$

したがって、

$$A = -B = \frac{V_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)(L_1 + L_3)} \quad (2.18)$$

これより、クローバー電流 $i_c(t)$ は次のようになる。

$$i_c(t) = \frac{V_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)L} \{ e^{\lambda_1(t+t_1)} - e^{\lambda_2(t+t_1)} \} \quad (2.19)$$

次に右側のループを考えると、

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = 0 \quad (2.20)$$

この方程式を、初期条件 $t = t_1$ で $i(t_1) = I_0$ の元に解くと

$$i(t) = I_0 e^{-(t-t_1)/\tau}, \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (2.21)$$

となる。

また、クローバー電流も L, C, R の直列回路を考えればよく、初期条件としては $t = t_1$ で $i(0) = 0$ 、コンデンサの電圧 V_0 となるので同様に解析でき、

$$Ae^{\lambda_1 t_1} + Be^{\lambda_2 t_1} = 0, \quad L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=t_1} = V_0 \quad (2.22)$$

これより、クローバー電流 $i_c(t)$ は次のようになる。

$$i_c(t) = \frac{V_0}{(\lambda_1 - \lambda_2)L} \{ e^{\lambda_1(t+t_1)} - e^{\lambda_2(t+t_1)} \} \quad (2.23)$$

第3章 測定データの解析

3.1 physics2 練習帳

$$\left(\frac{1}{2}\right) \quad \left[\frac{1}{2}\right] \quad \left\langle \frac{1}{2} \right\rangle \quad \left| \frac{1}{2} \right| \quad \left\| \frac{1}{2} \right\| \quad \left\{ \frac{1}{2} \right\} \quad \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (3.1)$$

微分記号

$$dx \quad \frac{d}{dx} \quad \frac{df}{dx} \quad \frac{d^n f}{dx^n} \quad df/dx \quad \frac{d}{dx} f(x) \quad (3.2)$$

偏微分

$$\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \quad \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \quad \partial f / \partial x \quad \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) \quad \frac{\partial^5 f}{\partial x^2 \partial y \partial z^2} \quad (3.3)$$

Vector

$$\mathbf{v} \quad \vec{v} \quad \hat{\mathbf{v}} \quad \nabla \phi \quad \nabla \cdot \mathbf{x} \quad \nabla \times \mathbf{x} \quad a \div b \quad (3.4)$$

operator

$$\text{Re}[f(z)] \quad \text{Im}[f(z)] \quad \text{Tr}[A] \quad \text{rank}[A] \quad (3.5)$$

braket

$$|\psi\rangle \quad \langle\phi| \quad \langle\phi|\psi\rangle \quad |\psi\rangle\langle\phi| \quad \langle\psi\rangle \quad \langle\psi|A|\psi\rangle \quad |\langle\psi|A|\psi\rangle| \quad (3.6)$$

matrix

$$\begin{array}{cc} a & b \\ c & d \end{array} \quad \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

参考文献

- [1] M. Ono et al., TRISTAN RF system with normal conducting cavity, KEK Internal 87-6 (1987)