

# シンクロtronでは電源良ければ全てよし HIMACからJ-PARC/MRへ

杉本記念シンポジウム 2013年4月7日 大阪大学理学部

佐藤健次  
放射線医学総合研究所

シンクロtron時代～12年間+α(GSI、TARN II、HIMAC + J-PARC/MR)

シンクロtronでは電源良ければ全てよし

サイクロtron時代～25年間(阪大原子核実験施設、東大核研、阪大RCNP)

サイクロtronでは鉄芯温度が安定すれば全てよし

## 目次

1. 対称3線方式
2. HIMAC主電磁石電源
3. J-PARC/MR主電磁石電源
4. 土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論
5. まとめに代えて: 新しい電磁気学の到来の予感

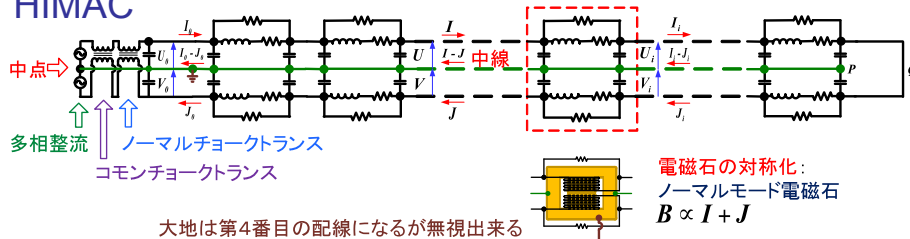
1

## 1. 対称3線方式

電源と負荷と配線の対称化

+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター

HIMAC



$$I = \frac{I+J}{2} + \frac{I-J}{2}$$

$$J = \frac{I+J}{2} - \frac{I-J}{2}$$



和(ノーマルモード)



差(コモンモード)

● ノイズが、従来の2線方式と比較して、  
1/100にまで削減出来る

● ノイズは波動!!!

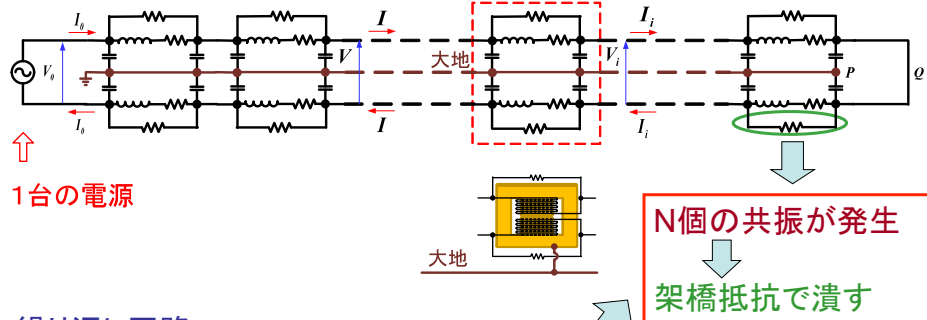
● 故障がない

2

## 2. HIMAC主電磁石電源

### 2.1 佐藤のシンクロトロンのはじめはGSIに始まる(1982)

#### GSIで見た3本線回路(CERNのCPSの設計報告書)



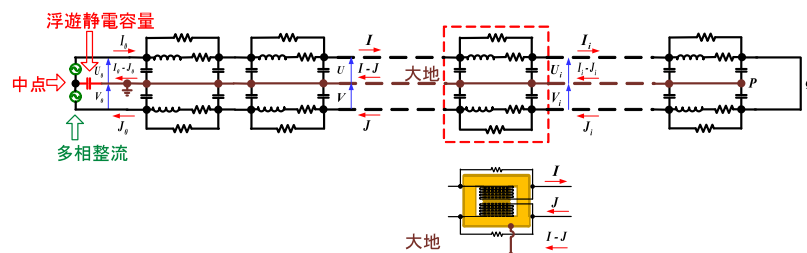
繰り返し回路

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ I_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} V_i \\ I_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} V_N \\ I_N \end{pmatrix}$$

- CERNのCPSでも、GSIのSISでも製作された様子がない
- 最新のLHC電源は「対称3線方式」である

3

### 2.2 HIMACに取り組んで気付いたこと(電源は上下に2台)



一般的には、和(ノーマルモード)と差(コモンモード)は結合する(4行4列)

$$\begin{pmatrix} U_0 + V_0 \\ I_0 + J_0 \\ U_0 - V_0 \\ I_0 - J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 + V_1 \\ I_1 + J_1 \\ U_1 - V_1 \\ I_1 - J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} U_i + V_i \\ I_i + J_i \\ U_i - V_i \\ I_i - J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} U_N + V_N \\ I_N + J_N \\ U_N - V_N \\ I_N - J_N \end{pmatrix}$$

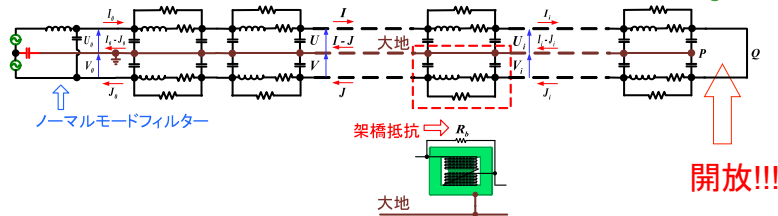
対称な配置のときは逆対角成分がゼロ: 部分空間が対角化される(2行2列)×2  
2つのモードの結合がほどける  $a_{13} = a_{14} = a_{23} = a_{24} = a_{31} = a_{32} = a_{41} = a_{42} = 0$

和(ノーマルモード)  $\begin{pmatrix} U_0 + V_0 \\ I_0 + J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 + V_1 \\ I_1 + J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} U_i + V_i \\ I_i + J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} U_N + V_N \\ I_N + J_N \end{pmatrix}$

差(コモンモード)  $\begin{pmatrix} U_0 - V_0 \\ I_0 - J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 - V_1 \\ I_1 - J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} U_i - V_i \\ I_i - J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} U_N - V_N \\ I_N - J_N \end{pmatrix}$  4

## 2.3 TARN II に架橋抵抗を提案

目には定かに見えないノイズがある

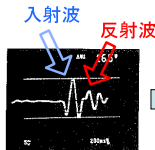


大・小・中・中  $I = 200 \text{ A}$

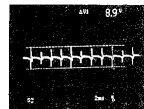


$$R_b = \infty$$

$$\frac{\Delta B}{B} \approx 4.2 \times 10^{-3}$$



田邊徹美さんによる測定  
電流の入射波に対して  
電流の反射波の位相が逆転：  
末端は開放

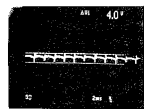


$$R_b = 200 \Omega$$

$$\frac{\Delta B}{B} \approx 2.2 \times 10^{-3}$$

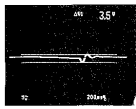


差(コモンモードノイズ)しか  
現われていない!!!  
和(ノーマルモードノイズ)に  
対してはフィルターがある



$$R_b = 50 \Omega$$

$$\frac{\Delta B}{B} \approx 1.0 \times 10^{-3}$$



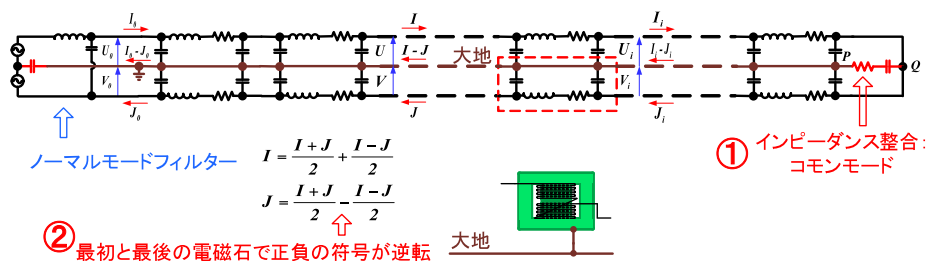
5

## 2.4 12GeV・PSでのインピーダンス整合、及び、コモンモードノイズ

目には定かに見えないノイズがある

松本啓先生の話:

12GeV・PSでは、右端に抵抗とコンデンサの直列回路を接地



② 最初と最後の電磁石で正負の符号が逆転

① 電磁石の自己インダクタンスLとコンデンサーCを測定:

特性インピーダンス  $\sqrt{L/C}$  が抵抗とほぼ一致

⇒ コモンモードに対してインピーダンス整合されていた

⇒ 反射波を消した!!!

② 最初と最後の電磁石のノイズは正負の符号が逆転

コモンモードノイズしか現われていない

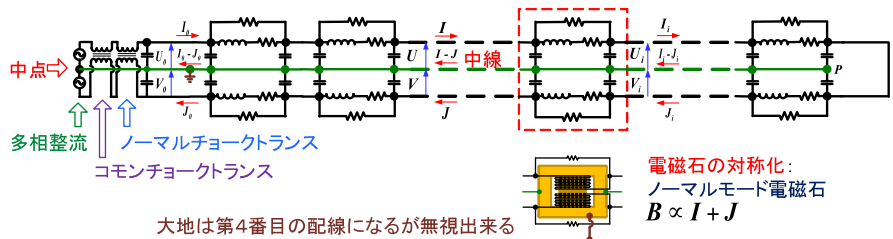
6

## 2.5 HIMACの「対称3線方式」電源

コモンモードフィルタを設ければ良い

⇒ 電源の midpoint に、中線をつないで、負荷と配線を対称化する

フィルター分離型



- ノーマルモードとコモンモードは結合しない

- 電磁石の対称化 ⇒ 磁場はノーマルモード電流のみで定まる

$$\frac{\Delta I}{I} \approx 2ppm \quad \text{さらに、アクティブフィルタの後段} \quad \frac{\Delta I}{I} \approx 0.3ppm$$

ノイズもナノワールドになった!!!

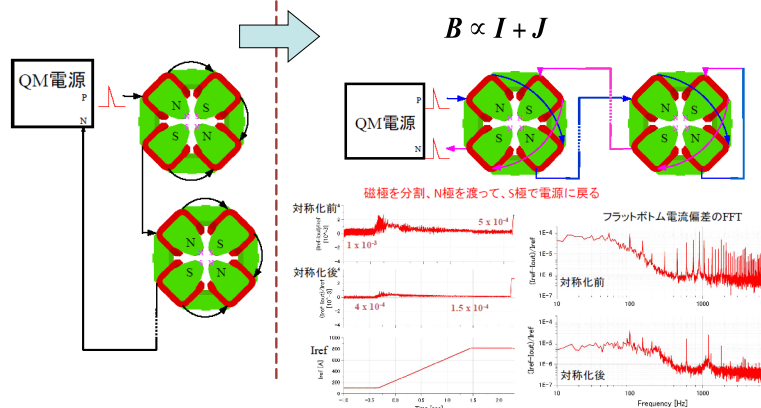
7

## 3 J-PARC/MR主電磁石電源

### 3.1 J-PARC/MRの四極電磁石の対称化

通常の結線

電磁石の対称化: ノーマルモード電磁石



- 電源は対称化されていない ⇒ コモンモードフィルタはない
- コモンモードノイズは発生している
- データ ⇒ コモンモードノイズとノーマルモードノイズの結合がほどけた 8

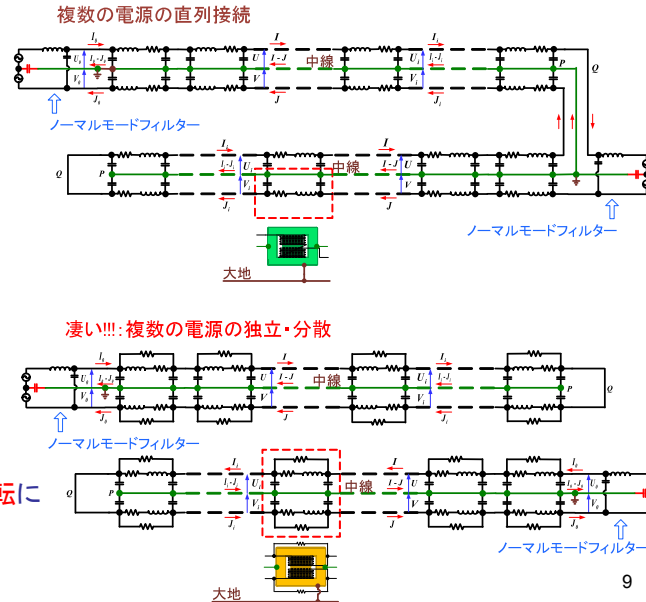
### 3.2 J-PARC/MRの偏向電磁石の対称化

対称化前:  
6台の電源の  
直列接続



対称化後:  
6台の電源の  
独立・分散

6台の電源の同期運転に  
成功!!!

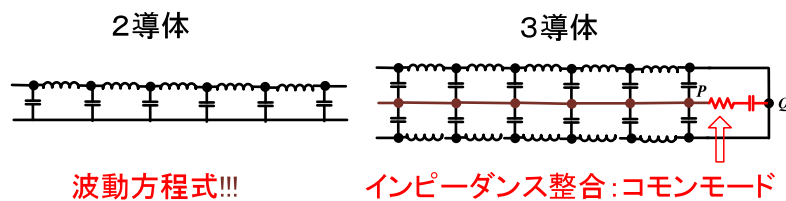


## 4 土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論

### 4.1 佐藤の予測:

結果として拙かった伝送線路回路のモデル

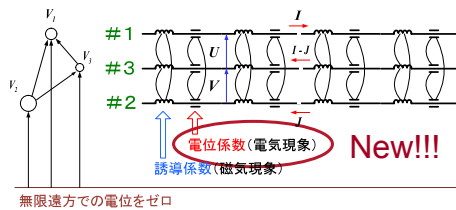
3導体の右端でインピーダンス整合 → 3導体伝送線路?!



コンデンサーでは3導体伝送線路の交流回路理論が作れない!!!

## 4.2 土岐博さんが発見した「電位係数は凄い!!!」

電磁波を放射しないときの等価回路: 3導体伝送線路



無限遠方での電位をゼロ

$$V_i(x,t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)}{|x-x'|} dx' = \sum_{j=1}^N P_{ij} Q_j(x,t)$$

$P_{ij}$  電位係数

$$A_i(x,t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{I_j(x',t)}{|x-x'|} dx' = \sum_{j=1}^N L_{ij} I_j(x,t)$$

$L_{ij}$  誘導係数 = ノイマンの公式

ノーマルモード(和)  $V_n(x,t) = U(x,t) + V(x,t)$   $I_n(x,t) = \frac{1}{2} \{I(x,t) + J(x,t)\}$

コモンモード(差)  $V_c(x,t) = \frac{1}{2} \{U(x,t) - V(x,t)\}$   $I_n(x,t) = I(x,t) - J(x,t)$

配線が対称化されていないとき

2つのモードは結合する (4行4列)

$$\begin{cases} \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial x} = -L_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} - L_{nc} \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial t} = -P_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} - P_{nc} \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial x} = -L_{cn} \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} - L_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial t} = -P_{cn} \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} - P_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \end{cases}$$

Common+Normal  
Comal(コマル)  
mode

配線が対称化されているとき

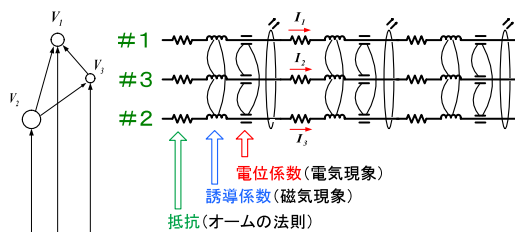
2つのモードは結合しない (2行2列) × 2

$$\begin{cases} \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial x} = -L_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial t} = -P_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial x} = -L_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial t} = -P_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \end{cases} \quad 11$$

## 4.3 土岐博さんが発見した

「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」

新しい交流回路理論: 電磁波を放射するときの等価回路



無限遠方での電位をゼロ

アンテナモード電位はノンゼロで時間的に単振動  $V_a = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) + V_3 \neq 0$

アンテナモード電流はノンゼロで時間的に単振動  $I_a = \frac{1}{2} (I_1 + I_2 + I_3) \neq 0$

ノーマルモード

$$V_n = V_1 - V_2 \quad I_n = \frac{1}{2} (I_1 - I_2)$$

コモンモード

$$V_c = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) - V_3 \quad I_c = \frac{1}{2} (I_1 + I_2) - I_3$$

アンテナモード

$$V_a = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) + V_3 \quad I_a = \frac{1}{2} (I_1 + I_2 + I_3)$$

**遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!**  $\propto e^{-j\omega t}$

**電位**

$$V_i(x,t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j\left(x', t - \frac{1}{c}|x-x'|\right)}{|x-x'|} dx'$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)\cos\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' + j \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)\sin\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx'$$

$$= \sum_{j=1}^N P_{ij}(\omega) Q_j(x,t) + \tilde{V}_i(x,t)$$

周波数に依存  $P_{ij}(\omega)$   $L_{ij}(\omega)$

放射項  $\tilde{V}_i(x,t)$   $\tilde{A}_i(x,t)$

**ベクトルポテンシャル**

$$A_i(x,t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j\left(x', t - \frac{1}{c}|x-x'|\right)}{|x-x'|} dx'$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j(x',t)\cos\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' + j \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j(x',t)\sin\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx'$$

$$= \sum_{j=1}^N L_{ij}(\omega) I_j(x,t) + \tilde{A}_i(x,t)$$

伝搬(第1項) + 放射(第2項): 同時発生

電磁場の伝搬

電磁場の放射

電流  $I(x,t)$

電荷  $Q(x,t)$

基本方程式(連立偏微分方程式):

連続の方程式(真電荷と伝導電流) + 境界条件 + オームの法則<sup>13</sup>

### 4.4 1本の導体の等価回路

自己電位係数(電気現象)

自己誘導係数(磁気現象)

抵抗(オームの法則)

無限遠方での電位をゼロ

磁気現象と電気現象は同時に発生する

電位を定義出来る

1本の配線でも、マクスウェル方程式と同じく、磁気と電気的双対性が成立する

アンテナとして電磁波を放射するとき電位が時間的に振動する!!!

マクスウェルを含めて、これまで、誰一人として、気付かなかった!!!

James Clerk Maxwell  
A TREATISE ON ELECTRICITY & MAGNETISM  
Vol. I

## 5 まとめに代えて:新しい電磁気学の到来の予感

「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」

- 電気信号の伝搬と電磁波の放射とは同時に発生する
- 従来の電磁気学:電気信号の伝搬現象のみを取り扱う
- 従来のアンテナ理論:電磁波の放射現象のみを取り扱う

「電位係数は凄い!!!」

- 電位係数は適切な物理量で、コンデンサーは不適切な物理量
- コンデンサーを流れる変位電流は不適切な物理量
- 変位電流を含むキルヒホフの第1法則(電流則)には限界がある

新しい電磁気学の到来の予感!!!