

KEK Internal 2009-4  
October 2009  
A/H/M

平成14年度

KEK 技術賞 受賞論文集  
The KEK Technology Prize 2002

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構



**High Energy Accelerator Research Organization**

© High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2009

KEK Reports are available from:

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi  
Ibaraki-ken, 305-0801  
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137  
Fax: +81-29-864-4604  
E-mail: [irdpub@mail.kek.jp](mailto:irdpub@mail.kek.jp)  
Internet: <http://www.kek.jp>

## 序 文

平成21年度KEK技術賞専門部会  
部会長 上野 健治

KEK 技術賞は平成12年度に発足し、これまでに優れた技術がその賞の榮譽を受けられ、それぞれの受賞者はさらなる研鑽を積まれて機構のプロジェクトにかかわる技術の開発・発展に活躍され、技術賞受賞の成果は勿論、関連する多くの実績と成果を残している。KEK 技術賞の高さは技術開発者から注目に値するものといえる。

さて、この KEK 技術賞には技術伝承をするという目的も持っており、技術賞受賞者の方々は必ずその成果を記録に残す、すなわち論文にまとめ公表することが義務付けられている。ただ、技術者の場合、既に次のプロジェクトを担当しているために、改めて報告書をまとめるとなると、相当な時間を要することもあり得る。このようなことから、技術賞が設立された当時、関係者も含めまとめることに十分な配慮ができずに時間が過ぎてしまい、平成19年度に未発表分の論文集がまとめられた時点でも間に合わない受賞分が残った。今回この対象である平成14年度分が、ここに正式論文として提出されたので、報告したいと考える。

機構を取り巻く新技術開発環境が激変する中においても、KEK 技術賞の価値はなんら変わることはなく、今回の報告論文においてもその成果は、現在はもとより将来にも十分生き残る財産であることは、論文を読んでもらえば理解されると思う。

今年度も技術賞の応募期間が始まっており、是非挑戦されることを希望します。

# 平成14年度 KEK技術賞 受賞論文

## 目 次

序文

受賞論文

1. ニュートリノビームライン250kA ホーン用パルス電源 . . . . . 1

鈴木 善 尋 (素粒子原子核研究所)

2. ニュートリノビームライン用電磁ホーンシステム . . . . . 48

山 野 井 豊 (素粒子原子核研究所)

編集後記 . . . . . 71

# ニュートリノビームライン

## 250kA ホーン用パルス電源

鈴木善尋

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所、物理第四研究系

### 概要

ニュートリノビームライン用 250kA パルス電源装置の設計、開発で必要となることは、最初にパルス電流発生回路の電気回路の検討、ついで使用する部品、製作可能性、経済性、耐久性、維持管理の容易さ、安全性等です。特に 250kA のパルス発生回路は検討の結果、入手可能部品の定格と必要なパルス電流(250kA)には隔たりがあり、パルス変圧器の製作が必要不可欠でした。次に検討、開発することは、12GeV-PS と同期した 2 秒周期のコンデンサの充電回路、それに続く 250kA パルス発生回路、そして、それらの相互に連携した周期運転の制御回路です。また、加速器の停止、運転再開に連動し、電源装置はコンデンサの放電、待機状態、再起動の自動運転も必要です。これは実験ユーザの運転の負担を軽減します。ニュートリノビームラインに、このパルス電源は 2 台使用され、途中、電源装置内部の導体の振動による折損の故障等ありましたが、無事、ニュートリノ K2K の実験終了まで運転の続行ができました。

以下に、最初にホーン用 250kA(キロアンペア)の電源装置(パワー系統)の設計、製作、その結果について、次に、ホーン電源のコントローラの構成、加速器との同期、コントローラのプログラムについて報告します。

### 目次

1. 250kA ホーン用パルス電源について
  - 1-1. ホーンについて
  - 1-2. ホーンの形状・その電氣的定数
  - 1-3. ホーンの運転(励磁)の方法
  - 1-4. コンデンサの放電によるパルス電流
  - 1-5. パルス変圧器の設計
  - 1-6. コンデンサの充電について
  - 1-7. 全体の回路構成、そのコントロール
  - 1-8. 全体のコントロール
  - 1-9. コンピュータからのパルス電源の運転
  - 1-10. パルス電源の仕様まとめ
  - 1-11. 設置

- 1-12. 運転結果
- 1-13. ホーン電流のモニターとインターロック（負荷の保護）
- 1-14. ホーン1とホーン2の加速器との同期運転
2. ホーン電源コントローラ
  - 2-1. コントローラの概要
  - 2-2. コントローラ仕様（STD-bus カードラック）と使用カード I/O マップ
  - 2-3. パルス絶縁基板
  - 2-4. コントローラ接続の詳細
3. ホーン電源コントローラの制御プログラムについて
  - 3-1. プログラムリストの構成
  - 3-2. カードの注意点、変更部分
  - 3-3. フローチャート1（GPIBより設定データを受けた時の処理、運転開始）
  - 3-4. フローチャート2（OPM0の処理：ホーン電源、運転操作シーケンス部分）
  - 3-5. フローチャート3（OP5の部分：正常にON、パルス運転に入る部分）
  - 3-6. フローチャート4（パルス運転、タイムチャート）
  - 3-7. PLSOPの説明（パルスオペレーション：加速器に同期したパルス運転）
  - 3-8. フローチャート5（ホーン電源の停止 DC OFF 処理）
4. 運転記録を振り返って（トラブルの原因、改良）
5. J-PARC ニュートリノビームラインでの再出発
6. 参考文献
7. プログラムリスト



ニュートリノ第二電源棟内、第一ホーン電源

# 1. 250kA ホーン用パルス電源の設計

## 1-1. ホーンについて

このパルス電源を設計するに当たり、まず知らなければならない事は、ホーン電磁石の電気的特性である。ホーン電磁石はパイ中間子を効率良く収束するように中心導体、電流経路、形状が決定される。その形状をもとに電気的特性を計算する。

ホーン電磁石はニュートリノビームラインにおいて2台使用される。図 1-1 にホーン電磁石の配置と粒子の収束される様子を光学レンズ系と対比して示す。

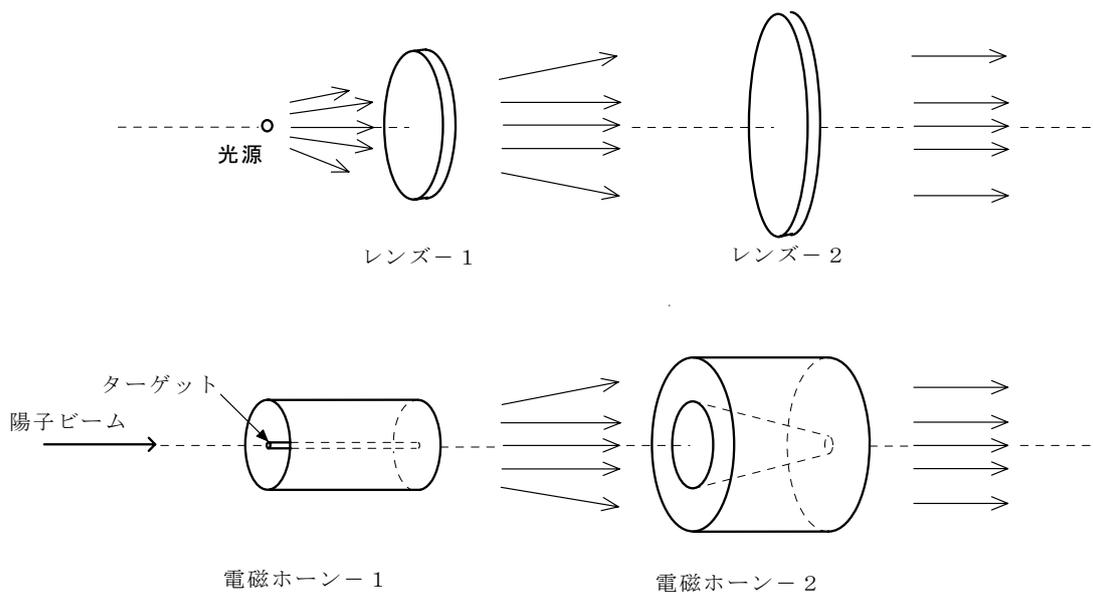


図1-1. 光学レンズと電磁ホーンの比較

図 - 2 は上流側のホーン電磁石（第一ホーン）についての電流の流れを示す。

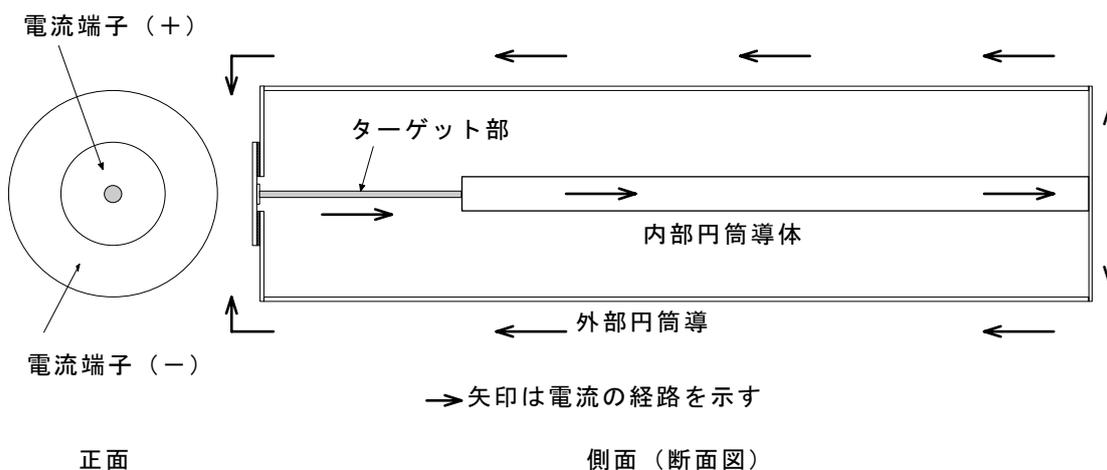


図 1-2. 電磁ホーンの電流経路

設計の初期の段階には、ホーンの設計とパルス電源の設計が平行して進むので、ホーンの概略寸法を元に電気的特性は計算により見積もった。その値を元に電源を設計することになる。ホーンに流す電流の要求は最大の場合 250kA (ターゲット直径 2 cm の場合、表面磁束 5 テスラ)

## 1-2. ホーンの形状・その電気的定数

表 1-1 にパルス電源の設計に用いたホーンの定数を示す。なおこの定数はホーン設の初期の数値であり最終的に完成したホーンの数値とは異なる。

| ホーンの定数(設計用)    |            |             |             |
|----------------|------------|-------------|-------------|
| 材質・アルミ (100°C) | 3.55E-08   | Ω・m         |             |
| ターゲット          | 長さ<br>0.5  | 半径<br>0.005 |             |
| 内部筒状導体         | 長さ<br>1.8  | 半径<br>0.06  | 厚さ<br>0.002 |
| 外部筒状導体         | 長さ<br>2.3  | 半径<br>0.3   | 厚さ<br>0.01  |
| 下流側円盤状端板       | 外半径<br>0.3 | 内半径<br>0.06 | 厚さ<br>0.002 |

(上流側端面は省略)

表1-1. (初期の設計段階での値)

表 1-1 の値をもとに、ホーンの抵抗、インダクタンスを計算する。またホーンへの電流供給用のブスバーについても計算し以下の値を得る。

(ブスバー：銅製 200W, 15t, 10d, 8000 L (2 枚重ね) 4 回路並列)

|      | 抵抗 $\mu\Omega$ | インダクタンス $\mu\text{H}$ |
|------|----------------|-----------------------|
| ホーン  | 217            | 1.03                  |
| ブスバー | 29.8           | 0.105                 |
| 合計   | 217            | 1.14                  |

表 1-2. ホーンの電気定数

## 1-3. ホーンの運転 (励磁) の方法

ホーン系のインダクタンス、抵抗値をもとに電流の供給方法について検討する。

### 1) 直流によるホーン運転

ターゲット部での発熱量について考えてみる。ターゲット部が直径 2 cm, 長さ 50cm とした場合には、抵抗は 56 マイクロオームとなり、直流 250kA によるその部分の電圧は 14 ボルト、損失電力は 3.5MW となる。直流による励磁は実現できないことがわかる。

## 2) パルス電流による運転

ホーンの発熱は、ターゲット部が主であり、この部分は直接、水により冷却される。発熱量はホーン的设计条件から、数キロワット以下に抑えることが要請されている。

| ターゲット発熱量の計算条件       |      |       |      |
|---------------------|------|-------|------|
| 電流                  | ピーク値 | 250   | kA   |
| 波形                  | サイン波 | 半サイクル | パルス幅 |
| ターゲット抵抗値 (20φ、50cm) |      | 56    | μΩ   |

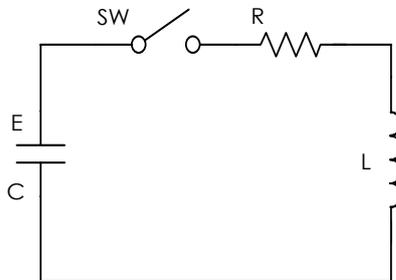
| パルス幅    | 5    | 4 | 3    | 2   | msec |
|---------|------|---|------|-----|------|
| 1パルス発熱量 | 8.75 | 7 | 5.25 | 3.5 | kW   |

表 1-3. ターゲットの 1 パルス電流による発熱量

表-3は、ホーンにピーク値が 250kA のサイン波で半サイクル分の電流を流した時の発熱量とそのパルス幅の関係についての計算結果である。ホーンに安全に流せるパルス電流は、パルス幅がおおよそ 3 ミリ秒以下ならば良いことが分かる。

### 1-4. コンデンサの放電によるパルス電流

#### 1) コンデンサの放電によるパルス電流



コンデンサはその内部抵抗が小さいことにより瞬時に大きな電流（パルス電流）を取り出すことができる。その放電電流の波形は以下の 3 つのタイプになる。

- 1) 非振動的放電電流
- 2) クリティカルダンパされた放電電流
- 3) 振動的放電電流

放電電流の波形が 2) の場合は、波形が 1 つの山を作り、最短時間で電流波形が終息するものである。そのよ

うな条件となる LCR の関係は、 $R = 2\sqrt{L/C}$  である。ホーンの励磁電流がクリティカルダンパ電流となる場合について検討する。ホーンに接続するコンデンサ容量 C、およびコンデンサの電圧 E、ピーク到達時間  $t_p$  を以下に示す。ホーンの状態として (1.14 μH, 217 μΩ) を用いる。

|               |      |           |
|---------------|------|-----------|
| コンデンサ容量 C     | 96.8 | F (ファラッド) |
| コンデンサ初期電圧 E   | 73.7 | Volt      |
| ピーク到達時間 $t_p$ | 10.5 | msec      |
| コンデンサ蓄積電力     | 260  | kW        |

表 1-4. ホーンにクリティカルダンパの振動電流を流す場合

表 1-4 から分かることは、ピーク到達時間が長く、ターゲット部発熱量が大きすぎることである。よって、このようなクリティカルダンプの放電電流ではホーンの運転ができないことが分かる。この場合（クリティカルダンプ）の利点はコンデンサにかかる電圧が逆転せず、極性のあるコンデンサ（容量の大きい、電解コンデンサ等）の選定が可能となることである。ホーンの要求を満たすためには、よりパルス幅の狭い、発熱量の少ない電流を流す必要がある。

## 2) コンデンサによる振動的電流

以上検討してきた結果から、放電電流のパルス幅を狭めることが必要である。コンデンサの放電電流で、ホーンの発熱量の制限をクリアする振動的な場合の検討結果を表 1-5 に示す。この検討はコンデンサ、サイリスタが現実に入手可能な物の定格条件を考慮し、製作の実現可能性について、下記の 5 項目について検討した。

- 1) コンデンサを最短距離でスイッチ、ホーンと接続できるか？
- 2) コンデンサの数量、その間の配線距離、抵抗、インダクタンス等？
- 3) サイリスタの定格制限による、並列、あるいは直列による回路の複雑化
- 4) コンデンサ、サイリスタの定格に近い厳しい運転による耐久性、寿命？
- 5) 放射線による維持管理の困難

検討の結果としては、コンデンサとホーンを直接つなぐ回路構成によってホーンの運転は困難であることがわかった。

## 3) コンデンサによる振動的電流+パルス変圧器

コンデンサとホーン負荷の間にパルス変圧器を入れた場合について検討した。パルス変圧器の変圧比  $n$  とし、コンデンサの電流が  $n$  倍されてホーンに流れるように接続する。 $n$  について 4 から 18 までについて検討した。検討の結果 変圧比  $n$  を 10 とし製作することを決定した。

表 1-6 にコンデンサを変化させた場合のホーンの励磁条件を示す。特にコンデンサの数量、サイリスタの段数等を考慮すると、コンデンサの容量が 5 から 2 ミリファラッドのところが最適な運転条件である。なお表 1-6 の結果には以下の数値がふくまれている

- ・ パルス変圧器のインダクタンスと抵抗を 2 次側の負荷の 10 パーセントと仮定して加算する。
- ・ パルス変圧器からパルス電源間のケーブルを 325m<sup>2</sup> のケーブル、70 m 分を加算する。

## 1-5.パルス変圧器の設計

パルス変圧器の使用により、ホーン、サイリスタ、コンデンサ等の定格の制限をう

コンデンサによるホーニングの励磁  
(振動的電流による-パルス変圧器無し:コンデンサと直結)

| 条件      |          |   |  |  |
|---------|----------|---|--|--|
| インダクタンス | 1.14E-06 | H |  |  |
| 抵抗      | 2.17E-04 | Ω |  |  |
| ピーク電流   | 2.50E+05 | A |  |  |

| C(F)  | ts       | E    | CV <sup>2</sup> /2 | A/μs     | A <sup>2</sup> *s | コンデンサ<br>数量(500MF) | サイリスタ                        |                 |               | 製作<br>可能性<br>判定 |    |
|-------|----------|------|--------------------|----------|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|----|
|       |          |      |                    |          |                   |                    | A <sup>2</sup> *s制限<br>パラレル数 | A/μs制限<br>パラレル数 | 電圧制限<br>シリーズ数 |                 |    |
| 1     | 1.58E-03 | 309  | 4.81E+04           | 1.59E+02 | 9.85E+07          | 2000               | 5.5                          | 0.5             | 0.078         | 6               | 不可 |
| 0.5   | 1.13E-03 | 419  | 4.42E+04           | 2.20E+02 | 7.09E+07          | 1000               | 3.9                          | 0.7             | 0.105         | 4               | 不可 |
| 0.1   | 5.20E-04 | 886  | 3.93E+04           | 4.81E+02 | 3.25E+07          | 200                | 1.8                          | 1.6             | 0.222         | 2               | 不可 |
| 0.01  | 1.67E-04 | 2712 | 3.68E+04           | 1.50E+03 | 1.04E+07          | 20                 | 0.6                          | 5.0             | 0.678         | 5               | 不可 |
| 0.005 | 1.18E-04 | 3817 | 3.64E+04           | 2.12E+03 | 7.38E+06          | 10,(13)            | 0.4                          | 7.1             | 0.954         | 8               | 不可 |
| 0.001 | 5.29E-05 | 8484 | 3.60E+04           | 4.72E+03 | 3.31E+06          | 2,(13)             | 0.2                          | 15.7            | 2.121         | 48              | 不可 |

| サイリスタの定格<br>SF3000GX21 |          |                   |  |
|------------------------|----------|-------------------|--|
| 定格電圧                   | 4000     | V                 |  |
| 実効オン電流                 | 4710     | A                 |  |
| 電流2乗時間積                | 1.80E+07 | A <sup>2</sup> *s |  |
| 臨界オン電流上昇率              | 300      | A/μs              |  |

| コンデンサ<br>定格 |                        | コンデンサ<br>設計寿命(パルス回数) |      |
|-------------|------------------------|----------------------|------|
| 電圧          | 8.5                    | kV                   | 2000 |
| 容量          | 500                    | μF                   | 60kA |
| 寸法          | 540W, 310D, 1015H (mm) |                      |      |
| 重量          | 220                    | kg                   |      |

表 1-5

# コンデンサによるホーンの励磁(パルス変圧器使用)

ホーンの場合

定格電流 250 kA  
 インダクタンス 1.14 μH  
 抵抗(+ブスバー) 217 μΩ  
 変圧比 10

1次側配線: 変圧器からパルス電源は325mm同軸ケーブル 70m使用

9.06mΩ、7.91μH

パルス変圧器については、2次側の10%分を仮定

| 1次側数値 |       |       |       | サイリスタ    |       |       |                    |
|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|--------------------|
| kA    | L(μH) | R(mΩ) | C(mF) | ts(msec) | E(kV) | P(kW) | CV <sup>2</sup> /2 |
| 25    | 133   | 33    | 10    | 1.66     | 3.54  | 62.8  | 62.8               |
| 25    | 133   | 33    | 5     | 1.2      | 4.73  | 56    | 56                 |
| 25    | 133   | 33    | 3     | 0.95     | 5.92  | 52.6  | 52.6               |
| 25    | 133   | 33    | 2     | 0.78     | 7.10  | 50.4  | 50.4               |
| 25    | 133   | 33    | 1     | 0.56     | 9.77  | 47.7  | 47.7               |

| コンデンサ     |      | A <sup>2</sup> *s制限 |       | サイリスタ |       |
|-----------|------|---------------------|-------|-------|-------|
| 数量(500μF) | A/μs | A <sup>2</sup> *s   | パラレル数 | パラレル数 | 電圧制限  |
| 20        | 15.0 | 1.04E+06            | 0.058 | 0.050 | 0.886 |
| 10        | 20.8 | 7.53E+05            | 0.042 | 0.069 | 1.184 |
| 6         | 26.4 | 5.91E+05            | 0.033 | 0.088 | 1.480 |
| 4         | 32.1 | 4.87E+05            | 0.027 | 0.107 | 1.775 |
| 2         | 44.9 | 3.48E+05            | 0.019 | 0.150 | 2.442 |

| 制限条件   |                 | サイリスタの定格 |                       |
|--------|-----------------|----------|-----------------------|
| 取り扱う電圧 | 低い方が安全          | 定格電圧     | V                     |
|        | サイリスタの定格電圧      | 4000     | kV                    |
|        | 配電規定・電圧規格・部品の規格 | 4710     | μF                    |
| コンデンサ  | 寿命              | 電流2乗時間積  | A <sup>2</sup> *s     |
|        | 使用電圧            | 1.80E+07 | A/μs                  |
|        | パルスピーク電流        | 300      | kg                    |
|        |                 | 電圧       | 8.5                   |
|        |                 | 容量       | 500                   |
|        |                 | 寸法       | 40W, 310D, 1015H (mm) |
|        |                 | 重量       | 220                   |

コンデンサ

設計寿命(パルス回数)

|      |        |         |
|------|--------|---------|
| 2000 | 30,000 | 300,000 |
| 60kA | 40kA   | 20kA    |

表 1-6

まくクリアーできることがわかった。ホーンのパルス電流を得るのに 10 対 1 のパルス変圧器を使用することとし、その設計を行う。

### 1) 変圧器の定格としての 1 次電圧

表-6 からホーンの運転電圧として、コンデンサの 5 ミリファラッドから 2 ミリファラッドを想定すると、5k ボルトから 7k ボルトである。パルス変圧器の 1 次電圧の定格は 10k ボルト (ピーク値) とする。

### 2) 変圧器・巻き線 1 ターンの電圧

1 次電流は 25k アンペア (ピーク値) であるから、パワー・P として、125MVA をえる。このことから変圧器の巻き線 1 ターンあたりの電圧として 1kV 程度が想定されるが、巻き数 1 ターンを避けるため  $e=346$  ボルト(rms)とする。

### 3) 変圧器・鉄心の磁束

この  $e$  と変圧器の鉄心の磁束  $\Phi$  の関係は

$$e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f\Phi \quad (\text{ボルト})$$

である。ホーンに流すパルスの半サイクルの時間を 3 ミリ秒とし、周波数  $f$  として 167 Hz を使用する。鉄心の磁束  $\Phi$  として 0.467 Wb (ウェーバー)をえる。

### 4) 変圧器・鉄心の断面積

鉄心の磁束密度として  $B=1$  [T/m<sup>2</sup>] を採用すると、鉄心の断面積は 0.467 m<sup>2</sup> となる。変圧器の積層鋼板の占積率等考慮し、製造のための鉄心断面積は 0.5 m<sup>2</sup>、寸法としては 1 m x 0.5m とする。

### 5) 1 次巻き線、2 次巻き線のターン数 (コイルの巻き回数)

1 次と 2 次の巻き数比は 10 対 1、よって変圧器 2 次電圧は 1k ボルトである。変圧器の 1 ターンあたりの電圧は 346V、ピーク電圧としては 489 V として、 $1000/489=2.04$  より、2 次巻き線のターン数を 2 回とする。1 次巻き線のターン数は 20 回となる。

### 6) コイルの巻き方

このパルス変圧器は大電流をホーンにバランス良く流すために、二次側の出力端子を 4 回路分用意する。この 1 つの 2 次コイルは 20 ターンの 1 次コイルにより上下から挟まれるように配置する。このことにより、1 次、2 次コイルの結合を良くし、漏れインダクタンスを少なくする。4 つの 1 次コイルは並列に接続する。

### 7) パルス変圧器・数値のまとめ

|           |            |       |
|-----------|------------|-------|
| 変圧比       | 10 : 1     |       |
| 1次定格電圧    | 10         | kV    |
| 2次定格電圧    | 1          | kV    |
| 1次巻線 巻数   | 20         | 回     |
| 2次巻線 巻数   | 2          | 回     |
| 鉄心断面積     | 1000 × 500 | mm    |
| 磁束密度      | 1          | Tesla |
| 1次巻線 コイル数 | 4回路・並列     |       |
| 2次巻線 コイル数 | 4回路        |       |

### 8) 巻線の導体断面積について

この変圧器で使用するパルス電流は、2秒に1回であることから、パルス幅を3ミリ秒のハーフサイン波とすると、25kアンペアの実効値  $I_{le}$ は、

$$I_{le} = 25kA \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{3}{2000}} = 685 \text{ アンペア}$$

となる。

空冷式変圧器の電流密度は一般的に  $1m^2$ あたり1アンペア以下とするので、1次巻線として使用する導体断面積を  $800m^2$ とする。これは4コイル分の巻線の値であるから、4分の1とし  $200m^2$ が1コイルの1次巻線の断面積となる。同様な計算により、2次巻線の断面積（1コイル分）を  $2300m^2$ とする。

### 1-6.コンデンサの充電について

パルス電流を発生するためのコンデンサの充電方法について検討する。

コンデンサ  $C$ に直列に抵抗  $R$ を接続し電圧  $E$ を加えた場合、コンデンサの充電電

流  $I_c$ は、
$$I_c = \frac{E}{R} \varepsilon^{-\frac{t}{CR}}$$
 となる。

このことから、定電圧源によりコンデンサを充電する場合には、充電電流が充電の初期と終わりにおいて大きな開きがあることがわかる。この場合の充電器の定格は電圧と初期の充電電流により決定されるため、充電する電力に比べ大きな定格の充電器が必要となり不経済である。この点において充電は定電流により行うこととした。このような充電を行うには充電器の出力電圧は時間とともに一定に増加させる必要がある。コンデンサが必要電圧まで充電した（充電完了）後については、コンデンサの電圧をパルス電流の発生直前まで一定に保つ必要がある。コンデンサの電圧を一定に保つには、コンデンサに一定の電圧を加えておけばよい。以上からコンデンサに加える電圧と時間の関係は図 1-3 となる。

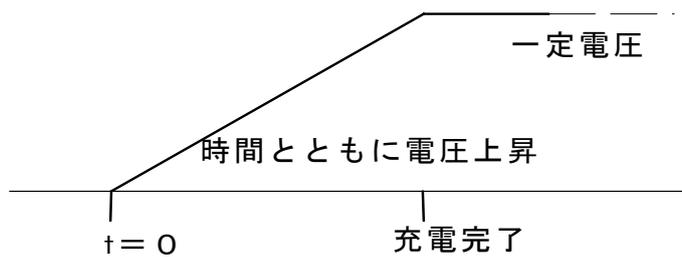


図 1-3. 充電時にコンデンサに加える電圧と時間の関係

### 1-7. 全体の回路構成、そのコントロール

このパルス電流発生装置の構成要素は、充電器、コンデンサ、サイリスタスイッチ、パルストランス、負荷としてのホーンである。これらの要素が結合され、装置として加速器の陽子ビームの取り出し（約 2.05 秒周期）に同期して連続運転する必要から以下のことを検討した。

#### 1) 充電器とコンデンサの接続時の問題

先に検討したパルス電流を発生する回路の特性は、パルス電流発生後に大きな逆電圧を発生しコンデンサが逆電圧で充電される。サイリスタスイッチは逆方向の電流を通さないで、コンデンサにはその電荷が残ることになる。それは以下の不都合を生じる。

- (1) この電荷は充電器に過大な逆電流として回りこむこと、
- (2) さらに充電電圧とコンデンサの電圧が逆極性であることにより、充電時に充電器に短絡電流以上の過大電流が流れるという不都合を与えること。

項目(1)についての不都合の解消は充電時には充電器をコンデンサに接続し、充電完了後は切り離すことにより可能である。しかし、この部分の回路構成を実際の部品として考えると、機械的な高電圧スイッチを数ミリ秒の間、OFF（開放）とする動作を 2 秒周期で連続動作可能かどうかという問題が生じてくる。一般的に電磁スイッチは動作電圧が加えられてから動作の完了までに数十ミリ秒必要とすること、また動作回数による寿命が短いことなどから使用できない。半導体のスイッチによる方法もあるが、回路部品の増加、複雑化を避けるため、結果として適切なインダクタンスと抵抗により、充電器とコンデンサを接続し、瞬時的な逆電圧による電流を阻止する方法を採用した。

#### 2) コンデンサに逆に充電された電力の処理

この処理方法としては、抵抗により熱として消費放出する方法、あるいは、もう一度 LC 回路を通すことによりコンデンサの電圧の極性を反転し、電気エネルギー

ギーを回生（再利用）する方法がある。後者については、ホーンに対して逆サイクルのパルスは熱の発生量、耐久性から流すことができないので別のインダクタンス（L）を準備することになる。そのインダクタンスには機械的強度が十分あり長期間のパルス運転に耐えることが要求される。今回はこのインダクタンスの開発は後回しとし、抵抗でコンデンサのエネルギーを処理することとした。ただし、将来的にエネルギーを回収できるようインダクタンスの接続端子を装置に用意しておくことにする。

結果としてこの部分は、コンデンサに対して、逆の電圧のみを選択的に流すダイオードと抵抗を直列に接続しておく構成となる。この抵抗値は、値によりパルス出力波形に影響を与える。計算の結果おおよそ 80 ミリオームがコンデンサ、ホーンの回路に対して臨界制動とする値である。この値を採用すると抵抗でのエネルギー消費の割合（ホーンに対しての）が小さいのでこの値以上を使用するのが良い。この抵抗値が大きすぎるとコンデンサのエネルギー消費に時間がかかるようになるので適切な選定が必要である。抵抗値として 400 ミリオームを使用することとした。これによりホーンからのエネルギーはより多くコンデンサに回収され、速やかに抵抗で消費されることになる。この時間に関することは、装置全体のコントロールの設計に必要なことである。

### 3) 充電器についての検討

充電器に使用する電力は、KEK、カウンターホールの電磁石励磁用電力である 400 ボルトを使用することとした。直流出力 10 キロボルトまでの電圧をどのように制御するか検討した。以下の 2 つの方法が考えられる。

(1) 整流変圧器の 2 次側を制御する

(2) 1 次側を制御する

- (1) については、電磁石用の直流電源に一般に採用されている方法で、2 次側にサイリスタ等、電力制御素子を接続する。この特徴は出力をフィードバック制御する場合に前向き伝達関数に不要な要素がないことにより応答速度が良い。このホーン用のコンデンサを充電する場合には、サイリスタの耐圧が 3 キロボルトほどであるため耐圧を確保するために、数段直列化する必要がある。これは点弧回路の複雑化、高耐圧化を招き好ましくない。
- (2) これは整流用変圧器の入力側（400V）を制御する。二次側には多段のダイオードの整流回路が付く。(1) に比べ簡略化される。出力についてのフィードバック制御は、前向き伝達関数の中に変圧器が入るため (1) に比べ応答速度が制限される。

検討の結果、信頼性、メンテナンスの容易さを考慮し (2) を採用した。

また、KEK 内での電力制御の内部申し合わせにより 12 相の電力制御を行うために移相変圧器により、30 度ずれた 2 つの 3 相電力を作り出す。そのそれぞれを 3 相全波制御（6 相制御）し、2 つの整流用高圧変圧器に接続される。それぞれの二次側にはダイオードブリッジが接続される。その 2 組のダイオードブリッジは並列に接続され、12 相制御された直流出力が得られる。

## 1-8.全体のコントロール

このパルス電流の発生装置は、以上見てきたように、充電器、コンデンサ、コンデンサからサイリスタによるスイッチ、パルス変圧器、そして負荷であるホーンである。そしてパルスの発生手順としては以下ようになる。

- 1) コンデンサの電荷がゼロであること
- 2) コンデンサの充電開始、電圧の上昇
- 3) 必要な電圧に充電後その電圧で保持
- 4) パルス発生直前に充電器を停止する
- 5) 充電器の停止、一定時間経過後サイリスタスイッチの動作可能な状態とし、トリガー待ちとする。
- 6) トリガー信号によりパルス発生。一定時間経過後にサイリスタスイッチの動作を停止状態とする。
- 7) 充電器によりコンデンサの充電を開始する。

以上の動作を行うためにマイクロコンピュータをパルス電源装置内部に配置した。そのマイクロコンピュータはさらに GPIB インターフェースにより上位のパーソナルコンピュータ等からこの装置が容易に制御できるようにプログラムした。(HMPSC: ホーン電源コントローラ)

## 1-9.コンピュータからのパルス電源の運転

このパルス電源装置に GP-IB 付きのパーソナルコンピュータを接続し、その HMPSC に対して、“D 5000” と電圧設定データを送る。この意味はコンデンサの充電電圧が 5000 ボルトを意味する。このデータを受信後の HMPSC の動作を以下に記す。

- 1) 電圧データ、ゼロ以外を受信
- 2) パルス電源のインターロックをチェックする
- 3) インターロックに異常がある場合は運転操作の中止、上位コンピュータに対してサービス要求の割り込みを発生。正常の場合は次のステップへ（以後の確認事項も全て異常時には上記同様の動作をする）
- 4) 充電器の主開閉器を ON とする。その後 3 秒間待つ（点弧回路の安定化に必要な時間）

- 5) ON 確認 (以後 ON 確認は全ての動作に対して並行して処理される)
- 6) トリガー信号の入力を有効にし、パルス電源運転状態にする
- 7) 加速器タイミング信号 (TS) 受信 (ビーム取り出し 20 ミリ秒前)
- 8) 充電器 (サイリスタ) の停止(OFF)をする。タイマー# 1 動作を開始する
- 9) 15 ミリ秒経過後に、サイリスタスイッチに対しての外部からのトリガーを有効とするために、トリガーゲートをオープン(開)とする
- 10) 加速器タイミング信号 (TA) 受信 (ビーム取り出し 1.1 ミリ秒前)
- 11) TA 信号は HMPSC によりコントロールされたディレー回路を通りサイリスタスイッチをトリガーする。コンデンサに充電されている電力はパルス変圧器を通してホーンへ出力される。タイマー# 2 の動作を開始する
- 12) ビーム到着信号を受けた場合は、タイマー# 2 の内容を記録する (ビーム到着時間の計測)
- 13) タイマー# 1 が 25 ミリ秒になったら、サイリスタスイッチのトリガーができないように、ゲートをクローズ (閉) する
- 14) タイマー# 1 が 45 ミリ秒になったら、充電器を ON とする
- 15) タイマー# 1 の動作を変更し、952 マイクロ秒のタイマーとする
- 16) 充電器の出力電圧を操作するレファレンス電圧発生用 DAC に最終電圧値となるデータをセットする
- 17) 952 マイクロ秒ごとの割り込みをカウントアップし、その値を DAC に書き込み、DAC の出力電圧を徐々に上昇してゆく
- 18) カウントアップ値が 2047 になったらカウントアップは停止し、充電器の出力をその値で一定とする。またタイマー# 1 をリセットし時間の計測を開始する
- 19) コンデンサの電圧を測定し、データを記録する
- 20) 加速器からのトリガー信号 (TS) を待つ
- 21) 10 秒経過しても TS 信号の無い場合は充電器を OFF とする。コンデンサの電圧は放電抵抗により徐々に低下する。タイミング信号 TS,TA を受けることにより充電を開始し正常のサイクルに戻る (加速器からビームの供給が無い場合にはコンデンサとホーンに対して無駄なストレスを加えないための策)
- 22) コンデンサの電圧は充電完了電圧である。正常であれば、充電完了から約 100 ミリ秒後に加速器から TS 信号を受け取る。・・・上記の (8) へ戻りパルス電源の運転を継続する。

停止の場合： コンピュータから “D 0” のデータを受けると以下の動作をする。

- 23) パルス運転の停止：次の一連の動作をすばやく行う。
  - 1) マイクロコンピュータ内部の動作を制御する割り込みの停止
  - 2) 加速器からのタイミング信号のゲートを全て閉じる
  - 3) DAC クリアー、充電器を停止

- 4) 充電器入力側の主開閉器を開放 (OFF) とする
- 5) OFF を確認し、動作の結果を上位コンピュータに対して GP-IB の割り込み要求 (SRQ) で報告する。

以上のように一連の動作が内部の HMPSC により処理される。このことにより上位のビームラインを管理するコントロールコンピュータの負担はほとんど無いといえる。またパルス電源装置の移動、セットアップが容易となる。

#### 1-10.パルス電源の仕様まとめ

ホーン用パルス電源の概略仕様を以下に示す。また図 1-4 にパルス電源の全体の系統図を、図 1-5 に 250kA パルス変圧器の製作寸法を示す。

##### 充電器部分

###### 入力条件

420V +10%, -5%

50Hz, 三相

###### 出力

電圧 8500V

電流 26A

負荷 コンデンサ 6mF

###### 環境条件

温度 0~35℃

湿度 90%以下

コンデンサ: 500マイクロファラッドを12個内蔵し、接続数量を切り替えられる構造とする。

##### パルス変圧器

1次電圧 (ピーク値) 10KV

1次電流 (ピーク値) 25KA

2次電圧 (ピーク値) 1KV

2次電流 (ピーク値) 250KA

周波数 167Hz以上

変圧比 10 (巻数20:2)

空冷

絶縁方式 H-種 モールド型

##### 使用条件

2秒周期のパルスによる連続運転

1次電流ピーク値 25KA

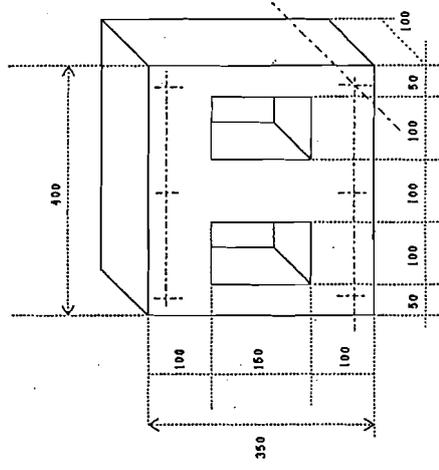
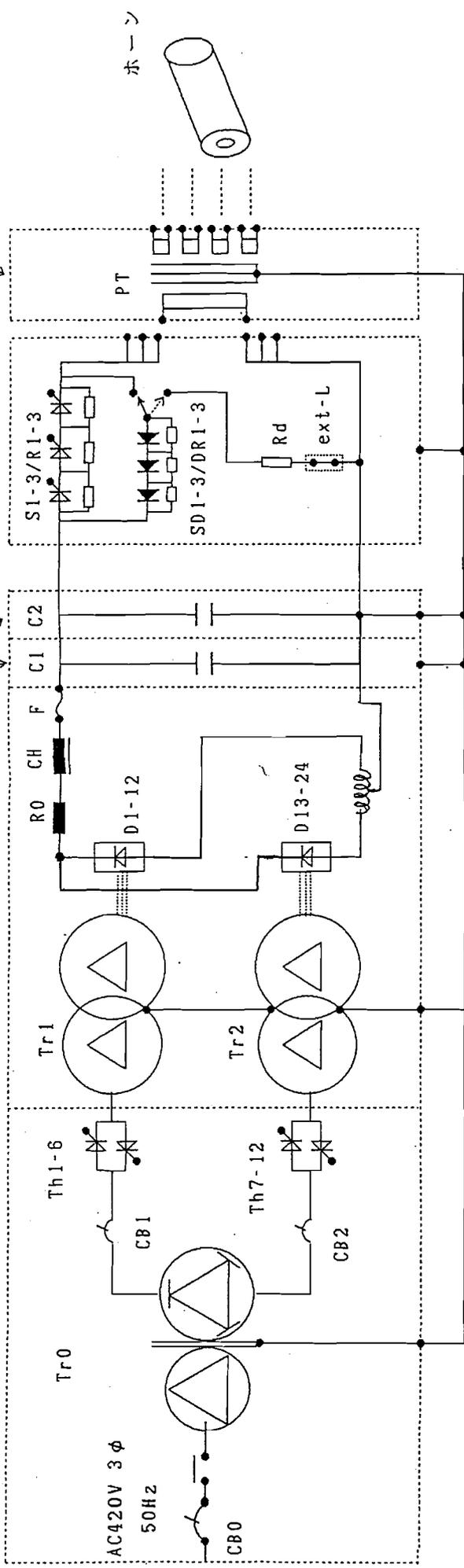
パルス幅 3msecのコンデンサ放電電流

コンデンサバンク  
2台

サイリスタスイッチ

直流高圧電源 (B)

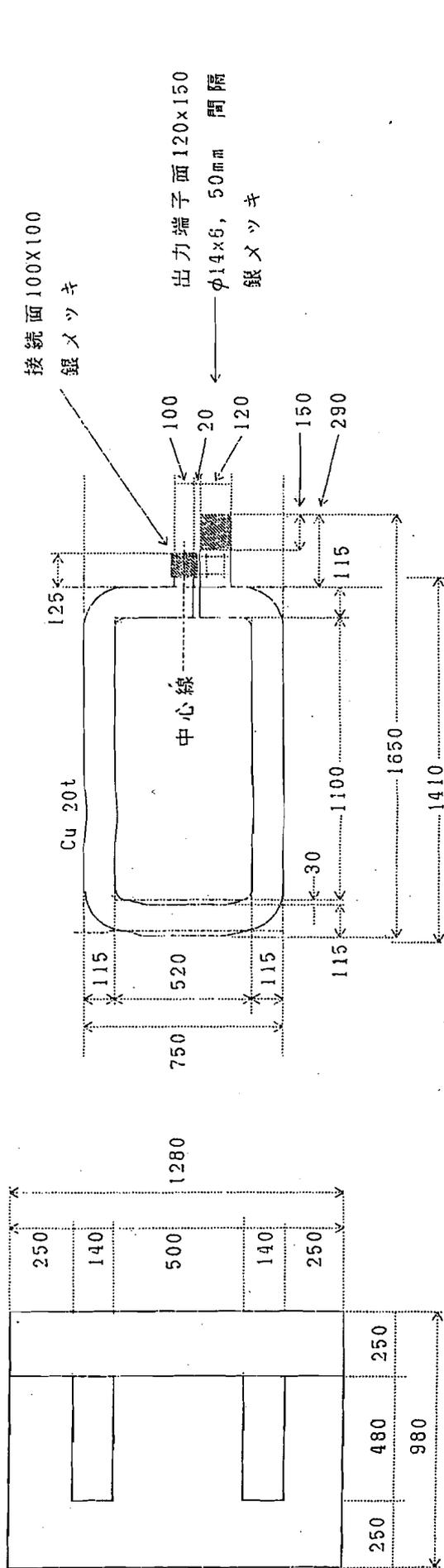
直流高圧電源 (A)



- CH: チョークコイル  
使用鉄心寸法  
(0.35mm厚珪素鋼板)  
巻線断面積 25mm<sup>2</sup> 以上  
巻数 150回  
電圧 10000V  
電流 20A  
絶縁 H種 真空含浸

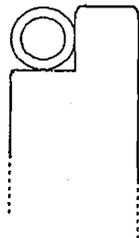
図1-4. パルス電源系統図

2次導体形状



鉄心 (珪素鋼板)  
積厚 1000mm

1次入力端子は端子台に固定され4回路バスバ  
一により並列に接続されていること。  
消磁巻線も端子台に固定されること。  
(銀メッキ仕上げ)



水冷却用銅パイプを2次導体外周加工  
部分に銀ロウ溶接する  
銅パイプは1巻線ごとに電氣的絶縁を  
行なう

図 1-5. 250kVA パルス変圧器

## 1-11. 設置

このパルス電源は 2 台製作された。この 2 台はニュートリノビームラインのターゲットステーション内のホーン 2 台に対し以下のような配線接続がされた。

- 1) パルス電源出力 (25kA) パルス変圧器 1 次側まで  
11k 高圧ケーブル (サイズ-150) 70m 3 本並列
- 2) パルス変圧器 2 次側 4 回路分からホーンまで  
主にアルミ板 (幅 320, 厚さ 15, 間隔 15, 4 回路分 8 枚) による配線接続、長さ約 10m。

## 1-12. 運転結果

|            | 第一ホーン | 第二ホーン |
|------------|-------|-------|
| パルス出力 kA   | 250   | 250   |
| 運転電圧(設定) V | 5756  | 4525  |
| コンデンサ mF   | 3.5   | 4.0   |
| 交流入力 A     | 150   | 145   |

図 1-6 に充電器をコントロールする DAC の出力 (レファレンス) 電圧、また充電器の出力 (コンデンサ電圧)、充電電流の波形を示す。これは HMPSC により 2 秒周期で充電器の制御が規則正しく行われていることを示す。また予定どおりコンデンサが一定の電流で充電されていることが分かる。

図 1-7 には 250kA 出力時のパルス変圧器 2 次側の電流波形を示す。上の波形が第一ホーンの電流波形、下が第二ホーンの電流波形である。そして、第二ホーンの電流波形が第一ホーンの電流波形より 100 マイクロ秒遅れていることが確認できる。これは HMPSC のディレー (遅延) コントロールによるものである。

図 1-8 はコンデンサがパルス発生後に逆電圧で充電された時に、充電器に流れ込む電流を示している(上の波形)。下の波形は出力されたパルス電流の波形である。充電器に回り込む電流はピーク値で約 60 アンペア、電流が 23 ミリ秒後にはゼロになっていることが分かる。これにより、この時以後、充電器を ON として充電を開始しても安全であることが分かる。

図 1-9 は充電サイクルごとのコンデンサ充電完了電圧のバラツキを示している。横軸は 2 秒周期の充電回数である。充電器のコンデンサに対しての電圧設定精度が 0.23%程と分かる。

図 1-10 はホーン電源交流入力(400V)の電流波形であり、12 相の電力制御が行われていることが分かる。

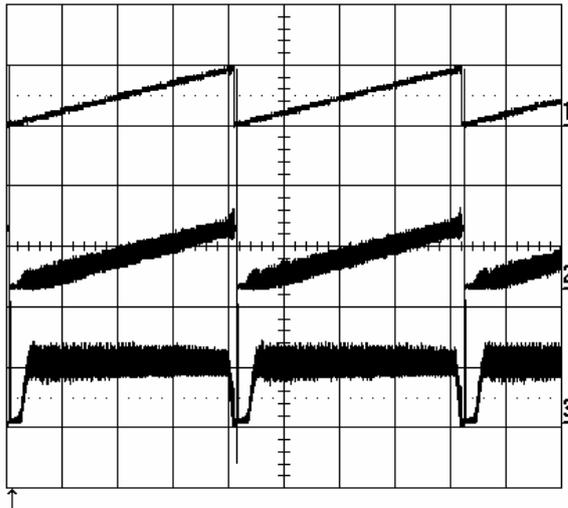


図 1-6. 2秒周期の充電器の運転

波形

1 : 充電器レファレンス電圧(5V/div)

2 : 充電器出力電圧(5kV/div)

3 : コンデンサ充電電流(10A/div)

横軸 : 0.5 s/div

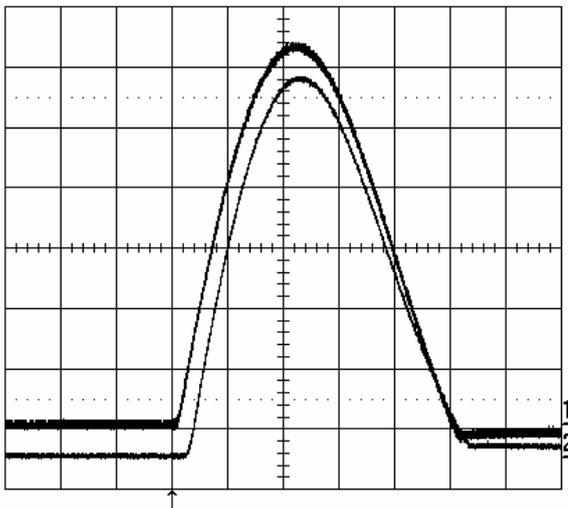


図 1-7. 250kA 出力時電流波形

2 台のパルス電源が加速器と同期して運転中

(変圧器 2 次側の 1 回路分 : 62.5kA)

波形

1 : ホーン 1 パルス電流(10kA/div)

2 : ホーン 2 パルス電流(10kA/div)

横軸 : 0.5 ms/div

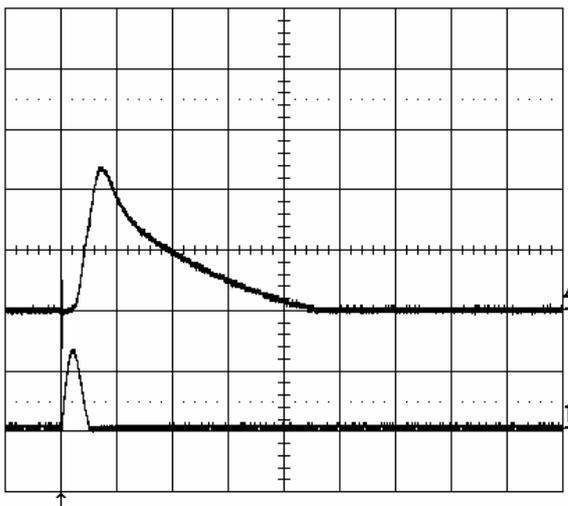


図 1-8. 250kA 運転時、パルス電流出力後、コンデンサは逆充電される。その時に、充電器に回り込む電流波形

(安全な範囲に制限され、23 ミリ秒で終息していることがわかる)

4 : 充電器に回り込む電流 25 A/div

1 : パルス出力電流(62.5kA p x4)

横軸 : 5 ms/div

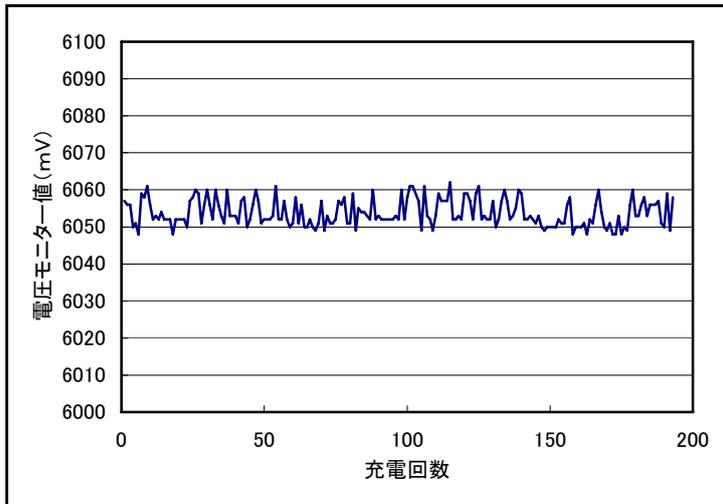


図 1-9.

充電電圧の安定性  
 (第 1 ホーン用パルス  
 電源、250kA 運転時)

変動幅 14mV  
 安定度 約 0.23%

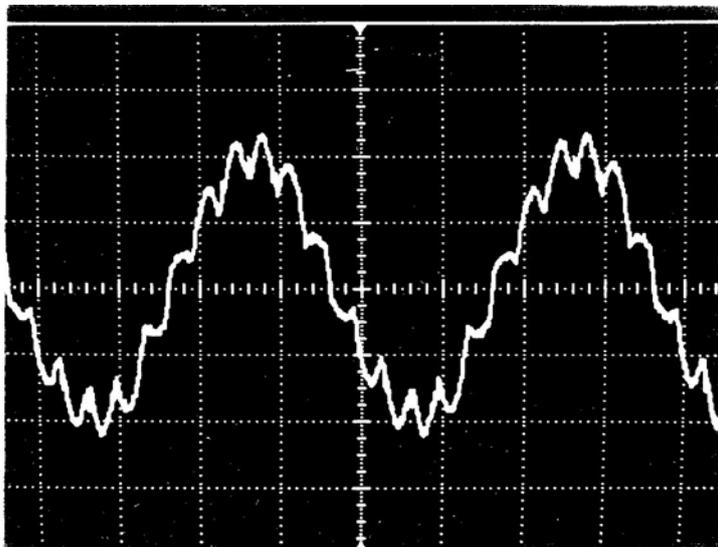


図 1-10.

250kA パルス運転時  
 第 2 ホーン電源  
 交流入力電流波形  
 (145A-rms)  
 5-msec/div

### 1-13. ホーン電流のモニターとインターロック (負荷の保護)

ホーン本体への給電端子はホーン円筒に対して、電流が外側円筒 (円周上) に均等に分布するように 4 箇所 (角度 90 度違い) の方向にある。外側円筒上の電流分布が均一であることは、ホーンが正しくパイ中間子をホーンを中心軸上に収束する点で重要であるばかりでなく、ホーン内部の中心導体に対しての偏った横方向の力の作用を防ぎ、中心導体の折損破壊を防止します。このホーンへの 4 つの給電電流は CT によりモニターされ、電流バランスが崩れた場合にはホーン電源の運転を停止します。図 1-11 にバスバーへの CT 組込部分を示します。CT は 4 個あり、CT の中心を通過する導体に横方向の力が作用しないようにバスバー内に組込まれます。またこの部分には、バスバー全体の抵抗値を調整するためのスライド抵抗 (半固定式) が組み込まれています (図 1-12)。

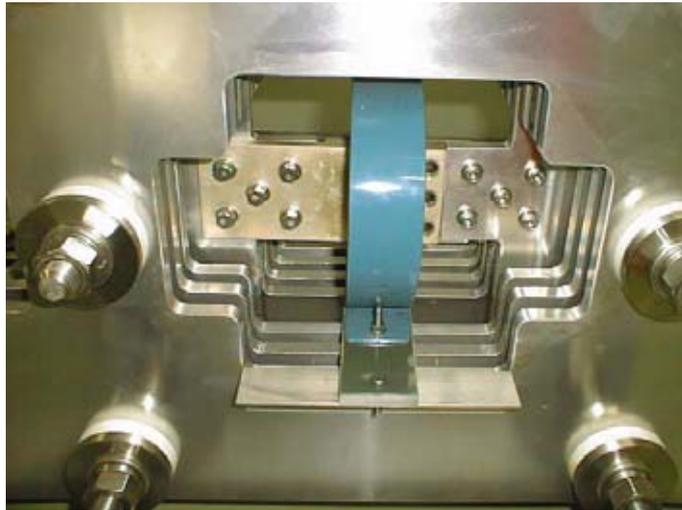


図 1-11. CT の組込 (写真

は 1 回路部分)

CT : 62.5kA(0.0001 V/A)

Stangenes 社製

アルミ導体 : 15t, 高さ

495、4 回路分全長 1700

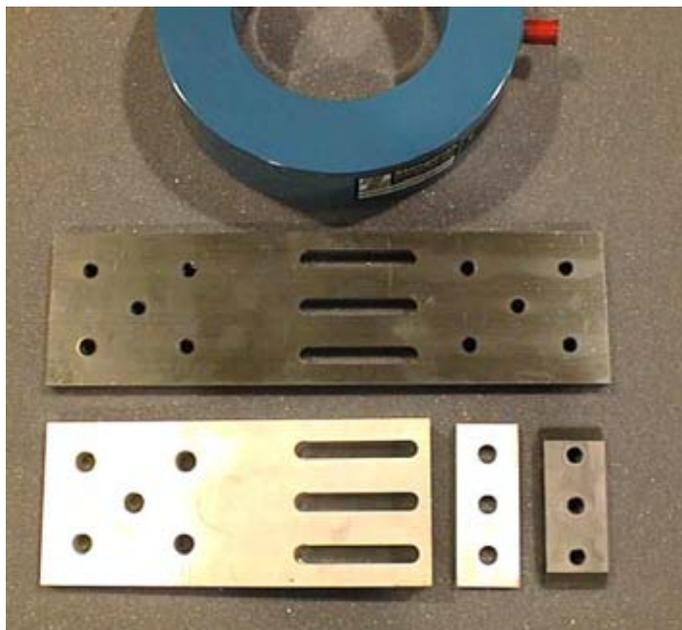


図 1-12. スライド抵抗

上 : CT, 62.5kA 測定用

中 : 抵抗 (SUS)

下 : 銅板、スライド銅板、  
固定用タップ付 SUS 板。  
抵抗値調整後にボルトに  
より固定する。

SUS 板 (280, 80, 10t)

10-M8, 3-9 φ-50 長穴

ホーンへの 4 回路の電流は上記の CT 4 個により測定されます。アンバランスは、CT の電流値をそれぞれ CT1, CT2, CT3, CT4 とし、OP アンプにより加算、平均し CT0 を得ます。CT0 と CT1~CT4 の差をアンバランスとして監視します。この差は OP アンプにより容易に電圧として得られます。実際の測定回路は、CT からのパルス電圧はメータで表示と監視が出来るようにピークデテクタ回路により 2 秒間保持させます。リセットは加速器からの TA (ホーン・サイリスタスイッチ・トリガ信号 : ビーム到着前 1.1msec) で行います。この電圧をプラス・マイナス 5000 アンペア表示のメータリレーに加えます。メータの上下限值 1000 アンペアを設定値として運転

を行いました（図 1-13）。このメータ指示値が上下限值を超えた場合、接点信号によりホーン電源はインターロック回路が動作し停止します。



図 1-13.

#### ホーン電流のバランス監視

左 4 個のメータは CT1~CT4 のアンバランス $\pm 5000A$ を表示、右のメータは CT4 個の合計  $250kA$  を表示。指示値は 2 秒間保持される。

（これはホーン 2 用の監視盤であり、同じホーン 1 用監視盤も別にある）

#### 1-14. ホーン 1 とホーン 2 の加速器との同期運転

ホーン 1 とホーン 2 はどちらも  $250kA$  で運転する。ホーン 1 とホーン 2 はインダクタンスが異なり、ピーク電流への到達時間が異なる。ビーム通過時にはどちらのホーンの電流も  $250kA$  となるようにパルス発生回路のトリガーに時間の調整（ディレイ）が必要である。試運転の結果、ホーン 1 については、加速器からの TA 信号により直接トリガーが良いことが分かった。ホーン 2 については、 $250kA$  ピーク値への到達時間が  $1msec$  であり、 $100$  マイクロ秒のディレイが必要であった。図 1-14 にホーン

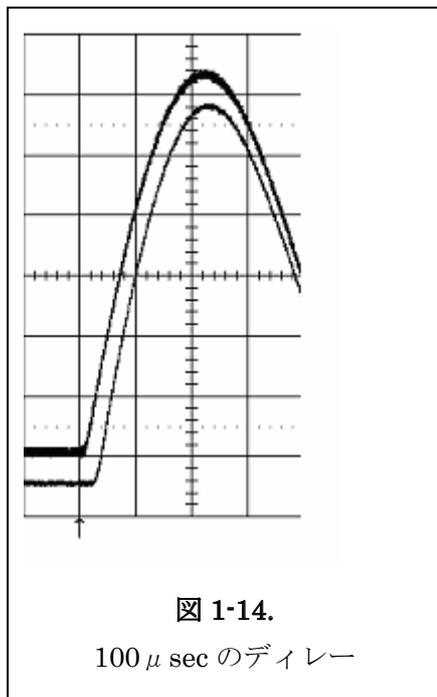


図 1-14.

$100 \mu sec$  のディレイ

の運転電流波形を示す、横軸  $500 \mu sec/div$  縦軸  $10kA/div$ 。上はホーン 1、下はホーン 2 の電流波形である。ホーン 2 について、立ち上がりが  $100$  マイクロ秒遅く、ピーク点に同じ時間に到達していることが分かる。

このディレイはホーン電源コントローラ（HMPSC）の機能により処理されている。 GPIB コマンド”DL”による。 $4$  マイクロ秒を単位とした  $1 \sim 255$  の範囲の数値、これにより  $4$  から  $1020$  マイクロ秒の遅延を生じる。”DL”に続く  $1$  バイトデータ（バイナリ値）+EOI を送る。

## 2. ホーン電源コントローラ（HMPSC）

### 2-1. コントローラの概要

ホーン電源コントローラは、ユーザ（運転者）と加速器、ホーン電源の間に位置し、ホーン電源を運転制御し、加速器のタイミングに同期させます。この装置の設計が開始されたのは 1995 年からであり、Windows95 が出た時期であり、HMPSC の主要部品はそれ以前のものとなる。実際、HMPSC のカード類は STD-bus (Z80) であり、開発は NEC-9800 上でクロスアセンブラによりなされた。

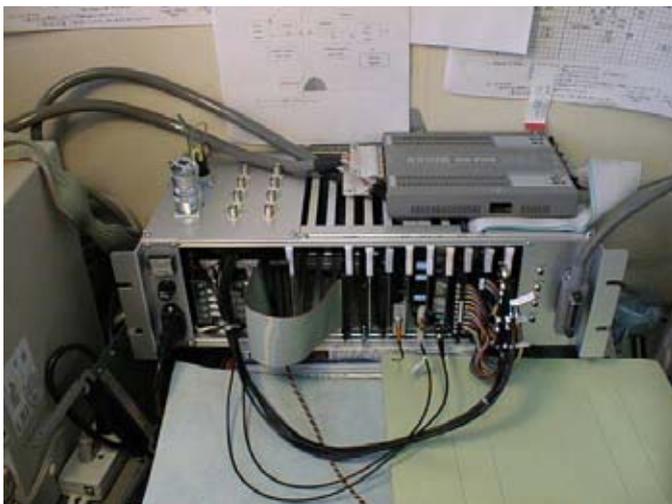


図 2-1.  
HMPSC の開発時の状況  
STD-bus ラックを使用  
ラック上の小さな箱は  
ICE：インサーキットエミュ  
レータ（Z80 開発装置）

アセンブラでの処理は、IO カード類、GBIP, CTC タイマー、DA コンバータの操作（IN/OUT）が主であり、高級言語を用いても、さほど能率が上がるものではないと思われる。Z80 のメモリーが 64k バイトであり、またスピードは 4 MHz クロックであり、CAMAC より速いか同程度である。ただこの装置は個々の末端の電源装置に組み込まれるものなので、処理のスピードとしては、十分なものであった。

この装置の機能、特徴は以下の点である。

1. PC より GPIB コマンドとして、充電設定電圧値を送ることにより、ホーン電源の運転は開始される
2. 運転の内容は、ホーン電源を加速器と同期させる、充電器の ON/OFF、コンデンサの充電、一定電流充電のためのランプ電圧の発生、充電完了後のコンデンサ電圧の測定、サイリスタスイッチの安全なトリガー、ディレーの処理等である
3. 加速器からのトリガー信号が一定時間停止した場合にはコンデンサ充電器を OFF としコンデンサの電圧を下げ待機状態とする。再び加速器のタイミング信号（ビーム取り出しのキッカー信号 TA）が来れば、運転を自動で再開する（ユーザの運転業務の軽減）。

図 2-2 にホーン電源コントローラとホーン電源の接続を示します。ホーン電源コントローラは小型なのでホーン電源内部に組み込まれます。

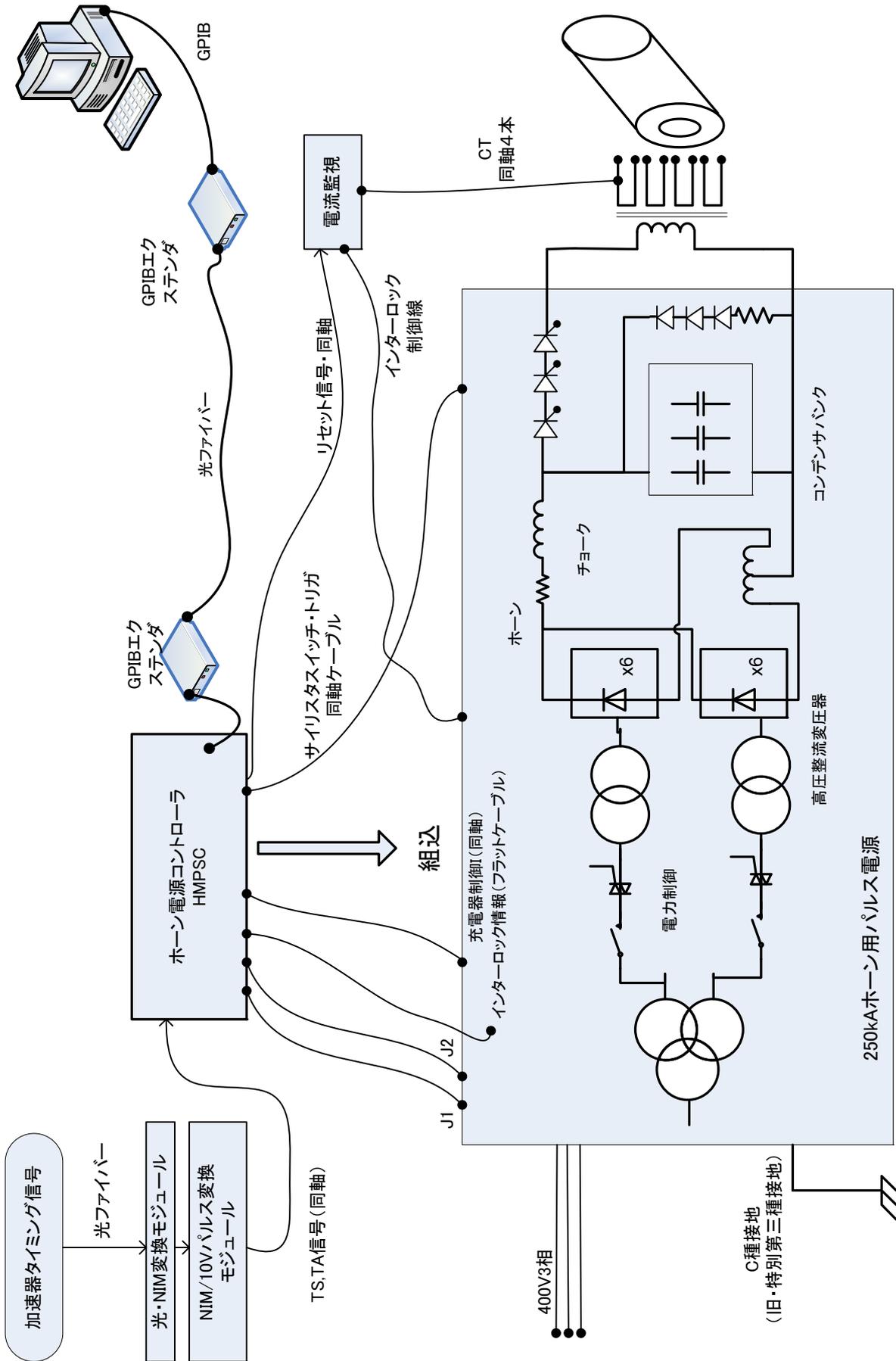


図2-2. コントローラの組込

コントローラとホーン電源の接続ケーブル類は以下の物です。

- 加速器からの信号 50Ω 同軸ケーブル 2 本 BNC、(TA: ビーム取り出し 20msec 前、TS: ビーム取り出し 1.1msec 前)
- GPIB ケーブル: 50Ω 同軸ケーブル BNC (GPIB エクステンダへの接続)
- J1: アナログ信号用コネクタ、バンディ 12 極、電圧、電流モニター、充電器の充電電圧制御用のレファレンス (参照) 電圧
- J2: シーケンス制御用コネクタ、バンディ 22 極
- 内部インターロック詳細信号、フラットケーブル 4 本
- 充電器制御: 50Ω 同軸 BNC

## 2-2. コントローラ仕様 (STD-bus カードラック) と使用カード IO マップ

ホーン電源制御用の STD\_BUS (図 2-1) ラックの形状、仕様は以下のとおりです。

1. 基本となる STD バスのカードラックは基板が 21 枚挿入可能な標準形状のラックを基に加工を行う
2. ラックの正面から見て左側に幅 3cm のパネルがあり、そこには電源スイッチ、5V、12V のチェック端子がある
3. 正面から見て右側に幅 7.5cm のパネルがあり、そこには GPIB のコネクタ、GPIB のステータスの表示用の LED がある。LED、GPIB コネクタにはフラットケーブルが配線され aSTD-115 (GPIB インターフェースカード) に接続できる構造にする。aSTD-115 が配置される位置スロットは右側から 6 番目となる。

スロット番号 (右側より)

1. 使用しない
  2. 使用しない
  3. 使用しない
  4. パルス信号絶縁基板
  5. aSTD-101 CPU カード
  6. aSTD-115 GPIB カード
  7. 16ch,12 ビット ADC (Astd-168)
  8. TSTD-5 (外部レファレンス型 16bit-DAC)
  9. TSTD-1 (16bit-DAC 40000 入力時 10V 出力)
  10. TSTD-4: コネクタ変換基板
  11. 16 チャンネル電圧変換基板
  12. TSTD03: 入力 16 点、接点出力 8 点
  13. 入力 24ch-1
  14. 入力 24ch-2
4. コネクタについて

正面から見て左側の上部のカードのガイドは取り除き、コネクタパネルを取

り付ける。このパネル上に配置されるコネクタは以下のもの

J1-バンディ 12 極コネクタ 1 個

J2-バンディ 22 極コネクタ 1 個

BNC コネクタ (絶縁されていること) 8 個

BNC-には同軸ケーブルが配線され、パルス信号絶縁カードの LEMO のコネクタに接続される。

5. BNC のコネクタには次の名称をつける

1. 充電スタートトリガー入力
2. トリガー直接入力
3. トリガー遅延入力
4. 充電器制御出力
5. SCR トリガー出力-1
6. SCR トリガー出力-2
7. ビームタイミング入力
8. 予備

6. 使用するカードと IO アドレスは下表のとおりです

ホーン電源コントローラのカードの IO マップ

| IO アドレス | 回路基板                                     | 機能        | 備考       |
|---------|--|-----------|----------|
| 00      | Astd-101<br>Z80-PIO                      | ポート A     |          |
| 01      |  | コントロール    |          |
| 02      |  | ポート B     |          |
| 03      |  | コントロール    |          |
| 04      | Astd-101<br>Z80-CTC                      | CTC-0     |          |
| 05      |  | CTC-1     |          |
| 06      |  | CTC-2     |          |
| 07      |  | CTC-3     |          |
| 10      | Astd-115<br>GPIB<br>TMS-9914             | INT0      |          |
| 11      |  | INT1      |          |
| 12      |  | アドレスステータス |          |
| 13      |  |           |          |
| 14      |  |           |          |
| 15      |  |           |          |
| 16      |  |           |          |
| 17      |  | データイン/アウト |          |
| 18      | Astd-115<br>Z80-PIO                      | ポート A     |          |
| 19      |  | コントロール    |          |
| 1A      |  | ポート B     |          |
| 1B      |  | コントロール    |          |
| 1C      | Tstd-02<br>8255<br>ディップスイッチ<br>6-1 にたいして | ポート A     | リレー接点出力  |
| 1D      |  | ポート B     | フォトカプラ入力 |
| 1E      |  | ポート C     | フォトカプラ入力 |
| 1F      |  | コントロール    |          |

|    |                                |                              |               |
|----|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| 20 | Tstd-01                        | この出力は Tstd-05 の<br>レファレンスとなる | 9c40H=10.000V |
| 21 | 16 ビット DAC                     |                              | low→high      |
| 22 | Tstd-05                        | ランプ電圧発生用<br>DAC              | ext-ref       |
| 23 | 16 ビット DAC                     |                              | 0000h→0ffffh  |
| 24 | Astd-168                       |                              | 内部電圧測定用       |
| 25 | 12bits-16CH-ADC                |                              |               |
| 28 | Tstd-04<br>ADC<br>AD1170       |                              | 充電完了電圧        |
| 29 |                                |                              | 測定用           |
| 2A |                                |                              |               |
| 2B |                                |                              |               |
| 2C | Astd111<br>24 ビット入力<br>カード (1) |                              | ポート A         |
| 2D |                                |                              | ポート B         |
| 2E |                                |                              | ポート C         |
| 2F |                                |                              | 制御用ポート        |
| 30 | Astd111<br>24 ビット入力<br>カード (2) |                              | ポート A         |
| 31 |                                |                              | ポート B         |
| 32 |                                |                              | ポート C         |
| 33 |                                |                              | 制御用ポート        |

### 2-3. パルス絶縁基板

パルス絶縁基板はホーン電源の運転で以下の重要な働きをします（回路図 2-3）。

- 加速器からのタイミング信号を絶縁、TTLに変換し、内部コンピュータに渡す
- サイリスタスイッチトリガー信号を適切な時に通すようにパルス発生回路のゲートのブロック、ディレーを行う
- ホーン電源充電器の ON/OFF 制御の信号を発生する
- ホーン電源の試験運転時のための回路（擬似 TA 信号発生回路）
  - この回路を使用する時は、ホーン電源へ TS 信号のみ加えれば良い。ファンクションジェネレータで 2.05 秒周期のパルス（電圧 5~10V）信号を川得る。パルス絶縁基板内部の[テスト運転用ジャンパー]を閉じる。
  - ホーン電源のインターロックのリセット（ホーン運転可とする）
  - HMPSIC に GPIB を通し、“D 1000”等のコマンドを送る
  - 停止は “D 0”である



## 2-4. コントローラ接続の詳細

ホーン電源コントローラとホーン電源の接続コネクタの機能について示します。コントローラ内部で使用するカードは標準(STD-BUS)です。入出力に使用するICはZ80、8ビット系でありプログラムとの関係は後述のプログラムリストのIOの定義に示されま

す。

### TSTD-03 カード関係の配線について (コネクタ変換基板：図 2-4, 図 2-5)

コントローラの内部のカード TSTD-03(TE261), aSTD-111 入出力コネクタはコネクタ変換基板(TE427)に接続される。それらの接続は以下のとおりです。

- カード TSTD-03(TE261) の CN1 ----- コネクタ変換基板：TE427-CN3
- カード(1) aSTD-111 の CN1----- コネクタ変換基板：TE427-CN2
- カード(2) aSTD-111 の CN2----- コネクタ変換基板：TE427-CN3

下表はカード TSTD-03 (TE261) のコネクタCN1 の機能で、ホーン電源のインターロックリセット、ON/OFF 操作、重要なステータスの読み出しが出来ます。

#### (1) TSTD-03 の入力ポートと接続信号

| 入力番号 | 信号名           | 接続先      | 備考              |
|------|---------------|----------|-----------------|
| PB-0 | コントロールパルサー ON | コネクタ変換基板 |                 |
| 1    | リモート          | J2-R/S   | 変換基板を経て J 2 へ   |
| 2    | レディー          | J2-T/U   | 変換基板を経て J 2 へ   |
| 3    | DC-ON         | J2-V/W   | 変換基板を経て J 2 へ   |
| 4    | 極性            | J2-C/D   | 変換基板を経て J 2 へ   |
| 5    | ヒューズ異常        | コネクタ変換基板 | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 6    | 入力系温度異常       | コネクタ変換基板 | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 7    | コンデンサ異常       | コネクタ変換基板 | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| PC-0 | 高圧スイッチ異常      | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 1    | 過電流           | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 2    | 地落電流検出        | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 3    | ファン異常         | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 4    | 扉開/点検中        | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 5    | ホーン磁石異常       | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 6    | 外部1異常         | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |
| 7    | 外部2異常         | 〃        | シーケンサーMD-N0.7 へ |

#### (2) TSTD-3 接点出力系の接続信号

| 接点番号 | 信号名   | 接続先           | 動作 (接点出力)   |   |
|------|-------|---------------|-------------|---|
| PA-0 | リセット  | J2-A/B (変換基板) | 一時的に接点を閉じる  |   |
| 1    | DC ON | J2-L/M (変換基板) | DC-ON 時 接点閉 |   |
| 2    | 転極操作  | J2-H/J (変換基板) | 一時的に接点を閉じる  |   |
| 3    | リモート  | 使用せず          |             | x |
| 4    |       |               |             |   |
| 5    |       |               |             |   |
| 6    | 定電流制御 | 電流電圧制御回路基板    | 定電流制御の時 接点閉 | x |
| 7    | 定電圧制御 | 〃             | 定電圧制御の時 接点閉 | x |

## コネクタ変換基板とホーン電源の接続

コネクタ変換基板は以下のものと接続される。(コネクタ変換基板回路図 2-4, 図 2-5. 参照)

2. J2 : ホーン電源本体のコネクタ (J2)
3. ホーン電源シーケンサのコネクタ (フラットケーブル)
4. 12V (+ : tstd03 のコネクタのピン番号 19,21,23,25 - : J2 の R,T,V,C)

## コネクタ変換基板とホーン電源内部のシーケンサとの接続

コネクタ間の接続は以下のとおりです。

- コネクタ変換基板 SEQ-CN1-----シーケンサモジュール No7.-CN1
- コネクタ変換基板 SEQ-CN2-----シーケンサモジュール No7.-CN2
- コネクタ変換基板 SEQ-CN3-----シーケンサモジュール No8.-CN1
- コネクタ変換基板 SEQ-CN4-----シーケンサモジュール No8.-CN2

コネクタの信号は下表のとおりです。

モジュールNo. 7-CN-1

| ピン番号 | 信号 機能                 | コイル番号 |
|------|-----------------------|-------|
| A1   | シーケンサ電源 ON            | 120   |
| A2   | 遠隔モード                 | 121   |
| A3   | 準備完了                  | 122   |
| A4   | 運転中 表示                | 123   |
| A5   | (極性)                  | 124   |
| A6   | ヒューズ、過電流、過電圧          | 125   |
| A7   | 入力系温度異常               | 126   |
| A8   | コンデンサ異常               | 127   |
| B1   | 高圧スイッチ異常              | 130   |
| B2   | パルス出力過電流-外部 9 インターロック | 131   |
| B3   | 地落電流検出-外部 10 インターロック  | 132   |
| B4   | ファン異常                 | 133   |
| B5   | 非常停止、扉、点検中            | 134   |
| B6   | ホーン電磁石異常              | 135   |
| B7   | 外部インターロック 1           | 136   |
| B8   | 外部インターロック 2           | 137   |

モジュールNo. 7の-CN-2

| ピン番号 | 信号 機能         | コイル番号 |
|------|---------------|-------|
| A1   | SCR 変換器扉開放    | 140   |
| A2   | SCR 変換器アースフック | 141   |
| A3   | SCR 変換器ファン停止  | 142   |
| A4   | SCR 変換器過電流    | 143   |
| A5   | 直流過電圧         | 144   |
| A6   | 高圧トランス盤温度異常   | 145   |
| A7   | 単巻トランス 2 過熱   | 146   |
| A8   | 単巻トランス 3 過熱   | 147   |
| B1   | 直流リアクトル過熱     | 150   |
| B2   | 高圧トランス盤扉開放    | 151   |

|    |                 |     |
|----|-----------------|-----|
| B3 | 高圧トランス盤アースフック   | 152 |
| B4 | 高圧トランス盤ファン停止    | 153 |
| B5 | 高圧トランス盤非常停止スイッチ | 154 |
| B6 | コンデンサ 1 異常      | 155 |
| B7 | コンデンサ 2 異常      | 156 |
| B8 | コンデンサ 3 異常      | 157 |

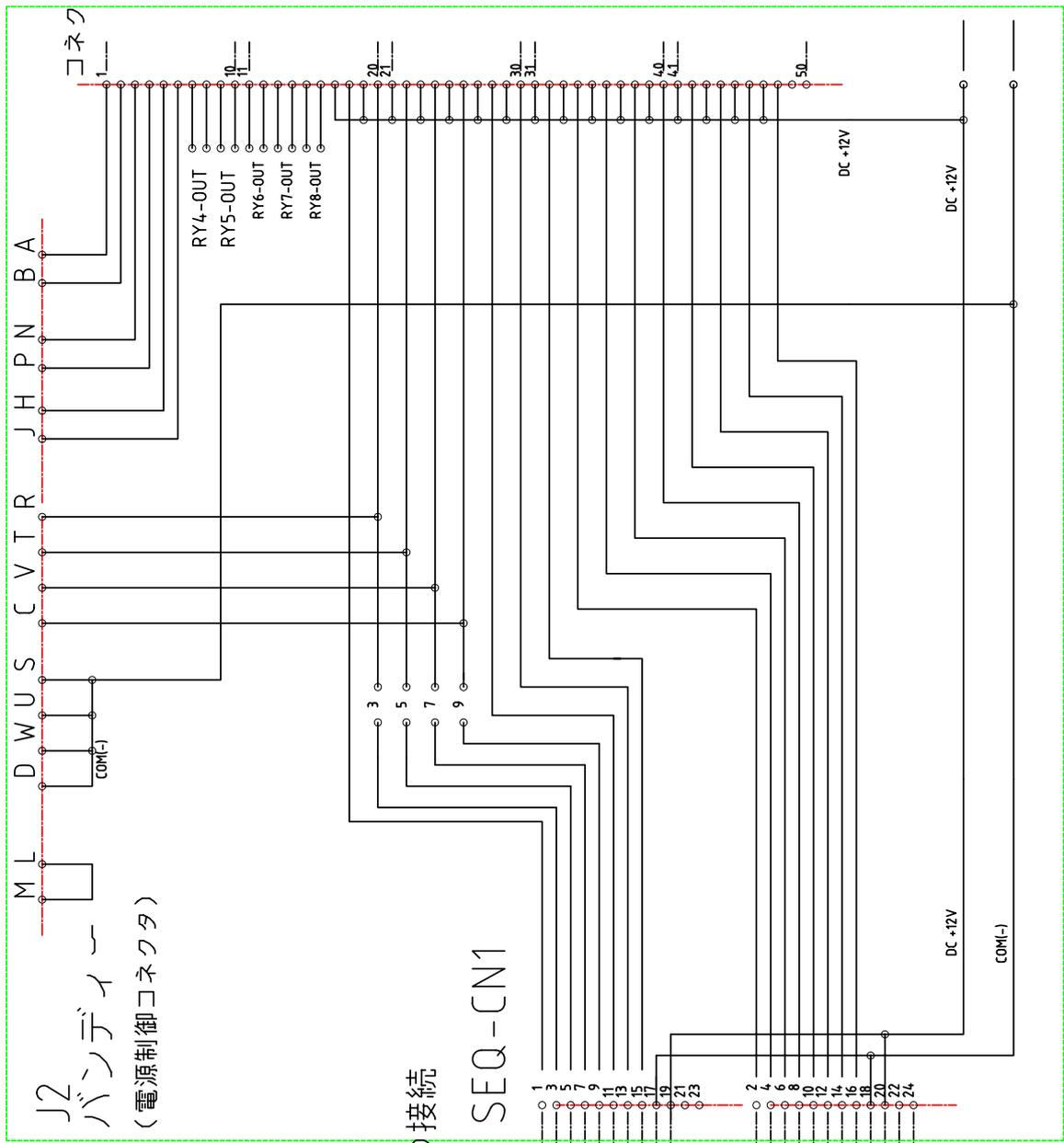
モジュールNo. 8 のコネクタ CN-1

| ピン番号 | 信号 機能        | コイル番号 |
|------|--------------|-------|
| A1   | コンデンサ 4 常    | 160   |
| A2   | コンデンサ 5 異常   | 161   |
| A3   | コンデンサ 6 異常   | 162   |
| A4   | コンデンサ 7 異常   | 163   |
| A5   | コンデンサ 8 異常   | 164   |
| A6   | コンデンサ 9 異常   | 165   |
| A7   | コンデンサ 10 異常  | 166   |
| A8   | コンデンサ 11 異常  | 167   |
| B1   | コンデンサ 12 異常  | 170   |
| B2   | 高圧スイッチ異常     | 171   |
| B3   | コンデンサ盤過熱     | 172   |
| B4   | コンデンサ盤扉開放    | 173   |
| B5   | コンデンサ盤アースフック | 174   |
| B6   | コンデンサ盤ファン停止  | 175   |
| B7   | SCR スイッチ盤過熱  | 176   |
| B8   | SCR スイッチ盤扉開放 | 177   |

モジュールNo. 8 のコネクタ CN-2

| ピン番号 | 信号 機能                       | コイル番号 |
|------|-----------------------------|-------|
| A1   | SCR スイッチ盤アースフック             | 180   |
| A2   | SCR スイッチ盤ファン停止              | 181   |
| A3   | SCR スイッチ盤非常停止スイッチ           | 182   |
| A4   | 電磁石異常                       | 183   |
| A5   | 外部インターロック 1 (CT1 アンバランス) 上限 | 184   |
| A6   | 外部インターロック 2 CT1 下限          | 185   |
| A7   | 外部インターロック 3 CT2 上限          | 186   |
| A8   | 外部インターロック 4 CT2 下限          | 187   |
| B1   | 外部インターロック 5 CT3 上限          | 190   |
| B2   | 外部インターロック 6 CT3 下限          | 191   |
| B3   | 外部インターロック 7 CT4 上限          | 192   |
| B4   | 外部インターロック 8 CT4 下限          | 193   |
| B5   | 外部インターロック 9 250kA 上限オーバー    | 194   |
| B6   | 外部インターロック 10                | 195   |
| B7   |                             | 196   |
| B8   |                             | 197   |

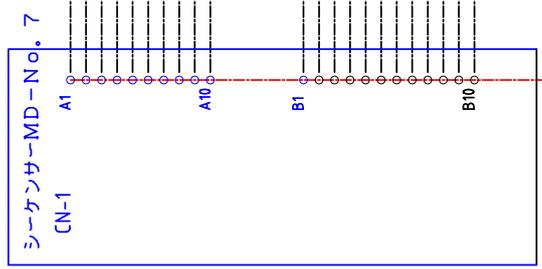
10-03  
 コネクター (ピンヘッダー)  
 HIF3BA-50PA-2.54DS  
 TSTD-03 へ接続



J2  
 バンディー  
 (電源制御コネクタ)

シーケンサーとの接続

SEQ-CN1



DC +12V  
 COM(-)  
 DC12V  
 COM(-)

コネクター変換基板(1/2)

図2-4.

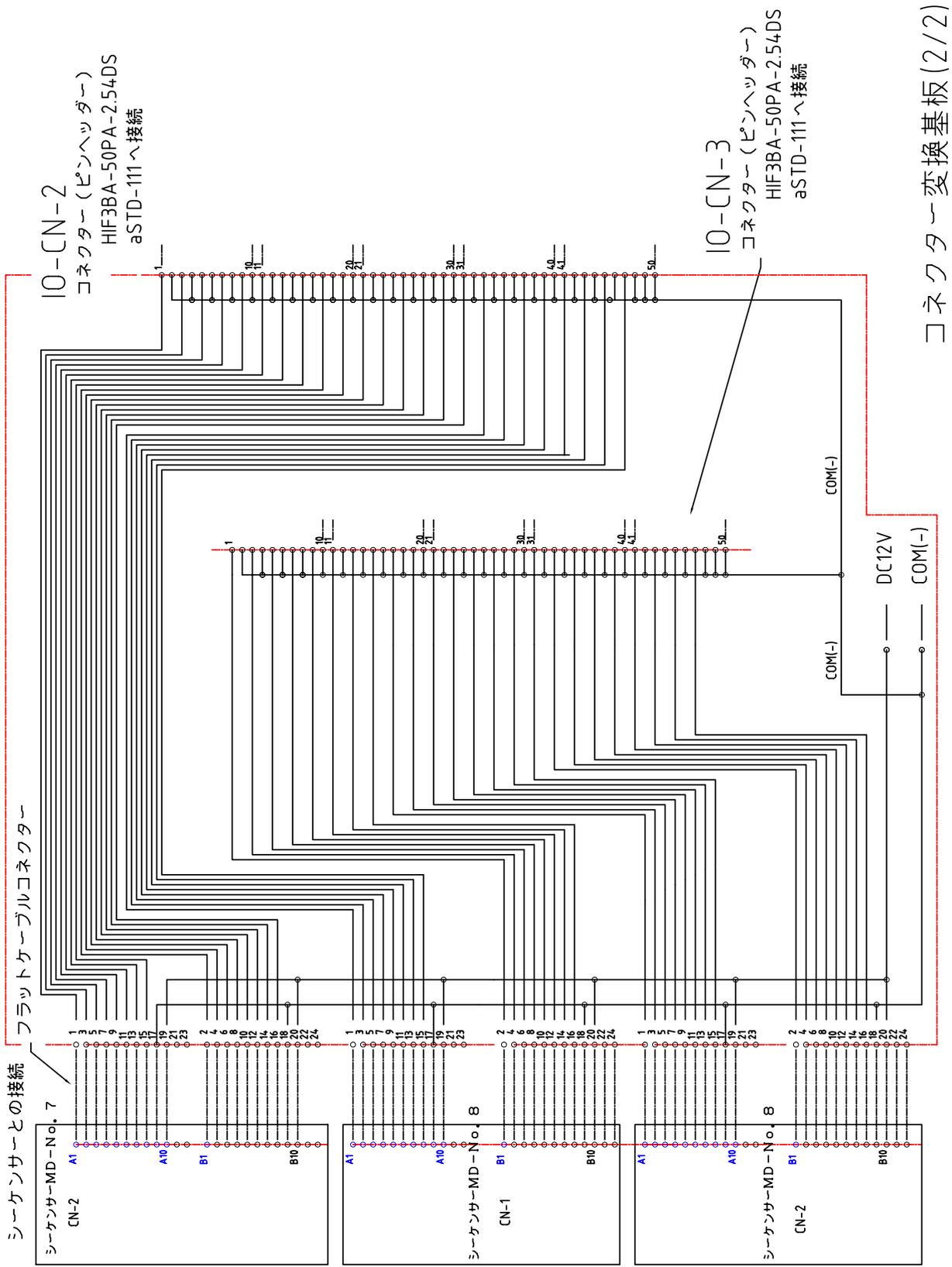


図 2-5.

## ホーン電源本体 (J1, J2) との接続

このコネクタは電磁石電源（ビームチャンネルグループ所有）の共通仕様になっています。以下 J-1, J-2 の機能について示します。

### J-1 レセプタクル（バンディ）G2B14-92PNE、ケーブル側：プラグ G6F14-92SNE

| ピン | 機能 (アナログ信号系) |      |
|----|--------------|------|
| A  | 電流モニター (+)   | 出力   |
| B  | 同上 (-)       |      |
| C  | 電圧モニター (+)   | 出力   |
| D  | 同上 (-)       |      |
| E  | 電流モニター       | シールド |
| F  | 電圧モニター       | シールド |
| G  | プログラム電圧 (+)  | 入力   |
| H  | 同上 (-)       |      |
| J  | 同上           | シールド |

### J-2 機能は直流電源の操作用接点信号の入出力用

レセプタクル（バンディ）G2B18-22PNE、プラグ G6F18-22SNE

| ピン番号 | 信号名         | 備考                              |
|------|-------------|---------------------------------|
| A    | リセット        | 操作                              |
| B    |             |                                 |
| C    | 極性状態        | 接点信号                            |
| D    |             | クローズ：+<br>オープン：-                |
| E    | COM         | 接点信号読み出し用                       |
| F    | 電源過電流トリップ   | 接点信号 E-F 間                      |
| G    | 電源重故障発生     | 接点信号 E-G 間                      |
| H    | 転極操作        | 0.2秒により起動                       |
| J    |             |                                 |
| K    | 電源漏水故障発生    | 接点信号 E-K 間                      |
| L    | DC-ON 操作    | 0.2秒クローズにより起動                   |
| M    |             | 電源側にて自己保持                       |
| N    | DC-OFF 操作   | 常時クローズ、0.2秒オープンにより OFF          |
| P    |             | 電源内部の ON 自己保持解除                 |
| R    | リモート (状態)   | 接点信号                            |
| S    |             | クローズ：リモート<br>オープン：ローカル          |
| T    | 運転可能 (レディー) | 接点信号                            |
| U    |             | クローズ：運転可能                       |
| V    | DC-ON 状態    | 接点信号                            |
| W    |             | クローズ：DC-ON 状態<br>オープン：DC-OFF 状態 |
| X    | 電磁石の状態      | 接点信号                            |
| Y    |             | クローズ：運転可能                       |

※接点信号のやりとりは DC30V 以下、50mA 以下とする。

※接点 A,H,L,N には+の電圧がでること(外部の信号読み出し回路は)。

### 3. ホーン電源コントローラの制御プログラムについて

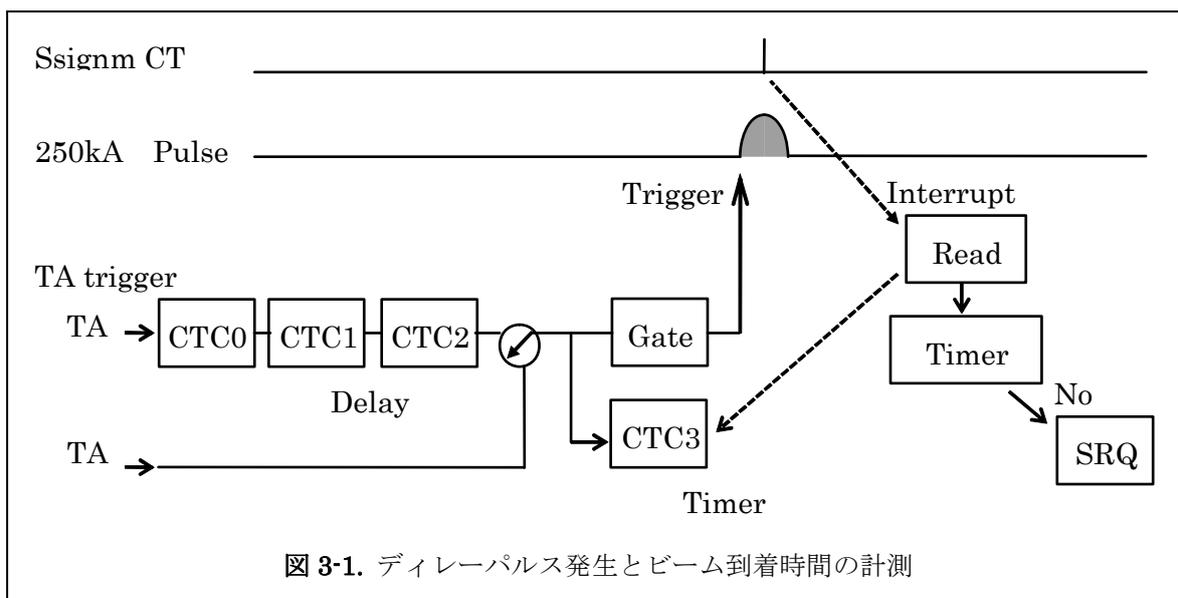
#### 3-1. プログラムリストの構成

添付プログラムリストについて説明します。以下にホーン電源制御の重要部分のリスト行番号とその処理内容を以下に示します。ここで、CTC とは Z80 ファミリーのカウンター・タイマー、PIO は Z80 ファミリーPIO:入出力 IC。TS トリガーはビーム取り出し 20msec 前の信号、TA 信号はビーム到着 1.1msec 前の信号

- 1～21 行：メモ、HMPSC の開発開始 1997/02/05～
- 22～104 行：Z80 アセンブラの宣言、(コードセグメント) IO アドレス、レジスタの定義
- 106～239 行：データセグメント、使用する変数の定義
- 241 行～：プログラム本体の記述、割り込み禁止、モード 2、スタックポインタのセット
- 249 行～：割り込みジャンプテーブル
- 259 行～：ICE での開発時に必要な番地指定のコード
- 263 行～：文字列データ
- 269 行～：START0: 初期設定・・・2865 行 START1 へ続く
- 307 行～：GPIB 割り込み処理、GPIB 通信
- 2865 行～：ホーン電源運転操作部分のプログラム (ループ)
  - 2868 行～、OPMAIN：ホーン電源停止、GPIB からの指示待ちの状態のループ
  - 2880 行～、OPM3: 出力の極性切り替えの有無を調べる (極性の切り替えには、運転中の場合は停止が必要になる)
  - 28891 行～、OPM0、現在の電源の運転操作段階 (OPF:オペレーションフラグ) を調べ、それを継続処理するために、その位置へジャンプする
  - 2972～、OP1, OP2 リセット操作、運転可能をチェックする
  - 3123～、OP3, 転極スイッチの操作、インターロックのリセット、チェック
  - 3239～、OP4, メインコンタクタ ON 操作、ON の確認
  - 3277～、OP5, 充電器出力電圧用のデータをセットする。(充電のタイミングは加速器からのトリガー信号、割り込みで処理される・・・別のプログラム)、異常停止の有無をチェックする
  - 3431～、OP6, 電源の停止操作
- 3458 行～、PLSOP：パルス運転開始部分、call PLSLP1：CTC カウンター・タイマー、PIO の割り込み設定 (加速器との連動のパルス運転は、加速器からのトリガー信号により割り込み処理される)
- 4354 行～、PIOINT：PIO からの割り込み処理。TS トリガー割り込みの場合は TSTRG へジャンプ、TA トリガー割り込みの場合は TATRG へジャンプ、ビーム通

過信号の割り込みの場合は MEGBT (TA 信号からビーム通過までの時間を計測) へジャンプ。

- 4367 行～、TATRГ : TA トリガー受信時の割り込み処理、この時にハードウェアによりサイリスタスイッチが ON となり 250k のパルスが発生する。それに平行してのコントローラ内部での処理です。以下の処理をします。
  - TS～TA トリガー信号間の時間を計測する。TATM に保存
  - PIO 割り込みを変更し、ビーム到着時間を計測できるようにする
- 4402 行～、TSTRG : TS トリガー信号 (ビーム到着 20msec 前) 受信時の割り込み処理、以下の処理をします。
  - 充電器の停止 (電力制御部) を OFF とする、DAC2 のクリアー
  - CTC1 を 1msec タイマーとして起動
  - ディレーを CTC0 に設定
  - CTC3 を用いてビーム到着時間計測準備、PIO の割り込み設定等
- 4465 行、MEGBT : ビーム到着時間計測タイマーの読み出し、BMT に書き込む



- 4483 行、CTC1INT : 1msec の割り込みをカウントし以下の処理をします
  - 割り込み時に STEP2 の値を 1 増します
  - STEP2 (カウント値) が 15 の時 (TS 信号後 15msec)、250kA サイリスタスイッチトリガーのゲート (安全装置) をオープンにします。これ以後 TA 信号が来るとサイリスタスイッチはファイアー (点弧 : ON) します
  - STEP2 の値が 25 の時、250kA サイリスタスイッチのトリガーゲートをクローズ (OFF) します。以後、パルスの発生信号をブロックします
  - STEP2 の値が 60 の時、充電開始の処理をします

- 4509 行、CHGST：充電開始タイマーセットアップ等の以下の処理
  - DAC の最終電圧値の値をセットする (DAC2 の設定はまだ 0、最終出力は DAC の値により決まる)
  - 電圧上昇時間 (電圧ステップ幅) のセット、2 秒でフルの場合はステップ (上昇幅) 20H (16bit-DAC、40000 が 10V 上限)、4 秒で上昇の場合は 10H
  - 充電器 ON、CTC2 の設定、952 マイクロ秒ごとの割り込み発生にセット
- 4595 行、CTC2INT：CTC2 タイマー割り込み、
  - PLSST の値が 4 の場合は、充電器 ON、充電中の割り込み。DA2UP の処理を実行
  - 上記以外 (PLLST<>4) の場合、充電完了 TS 信号待ちの状態。変数 T250A をインクリメントし、1 の場合には充電電圧測定用 ADC の値を読み込む。さらに T250 の値が 250 の場合 (充電状態で 12.5 秒後) は TS 信号タイムアウト (加速器からの信号異常) として、充電器の停止(OFF)と CT アンバラ監視装置リセット用のパルスを外へ出す (充電完了端子 BNC)・・・この部分を変更
- 4684 行、CHGOFF：充電器 OFF、250kA サイリスタスイッチトリガーゲートをクローズ (閉)、トリガー不可とする
- 4696 行、CHGON：充電器 ON の処理 (出力電圧の設定は DAC, DAC2 による)
- 4705 行、GPIB の通信で使用する文字列 (コマンドのチェック用、送り出し用の文字列) と数値処理用のデータ (実数)、その他定数等
- 4872 行、プログラム最後の行 END これ以後の行は、マクロとして CMDCK が使用されている。それ以後の行にシンボルが使用されているメモリー番地を示している

### 3-2. カードの注意点、変更部分

aSTD-115 GPIB インターフェースカードは、Z80CPU ボードと STD-bus によって接続されます。aSTD-115 の GPIB インターフェース、テキサスインスツルメンツの TMS-9914 の割り込みはレベル割り込みです。aSTD-115 のカードには不都合な部分があるので変更します (図 3-2)。Z80 の割り込みモードは 2 でデージチェーンの割り込みを使用します。割り込み順位は CTC カウンター・タイマーが高く、GPIB が下位です。GPIB は PIO を通して割り込みをかけます。

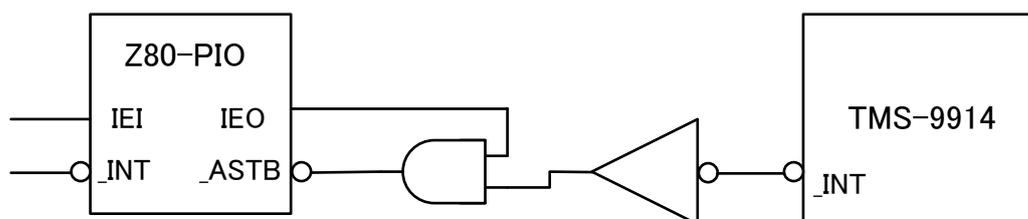
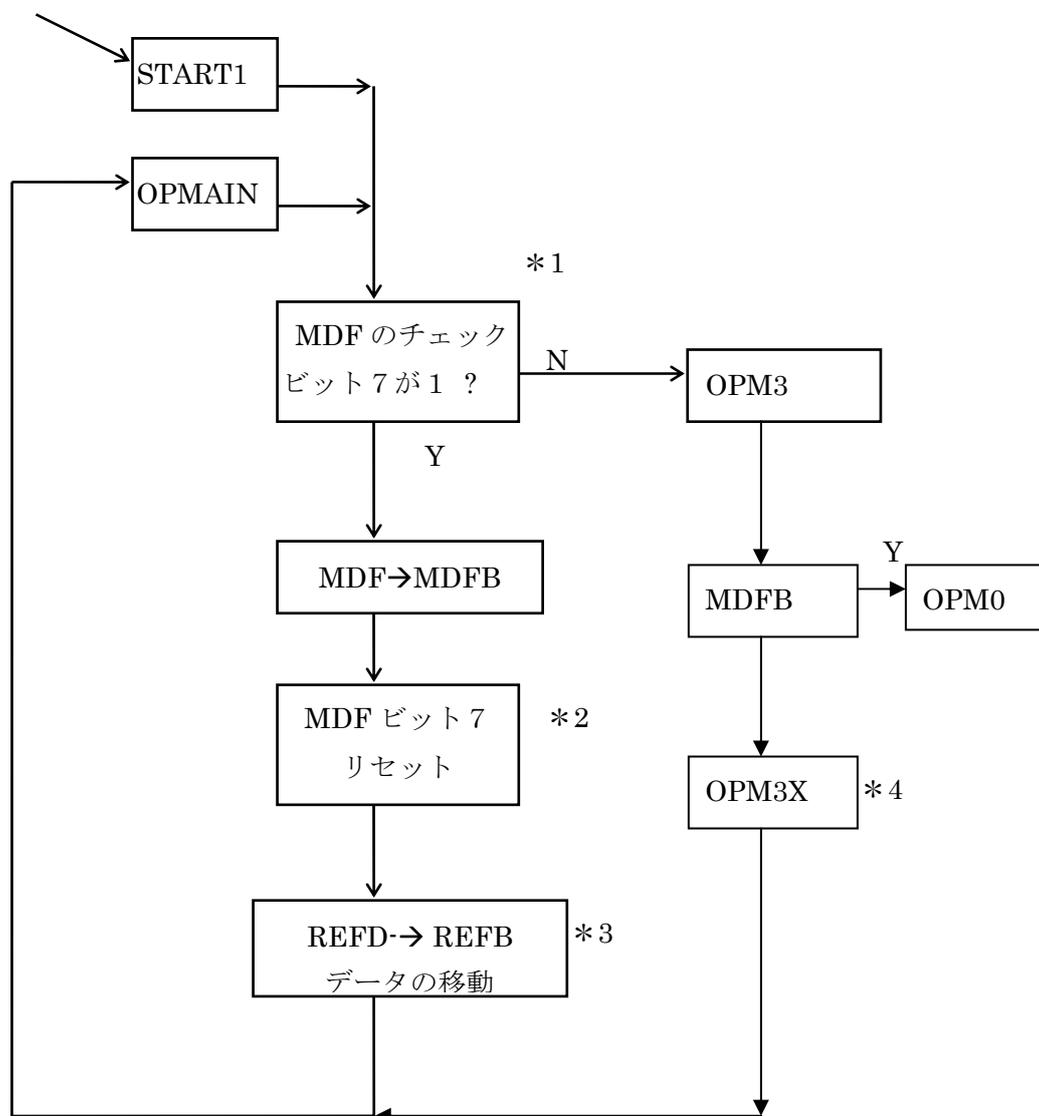


図 3-2. TMS-9914 割り込み回路の変更(aSTD-115)

### 3-3. フローチャート1 (GPIBより設定データを受けた時の処理、運転開始)

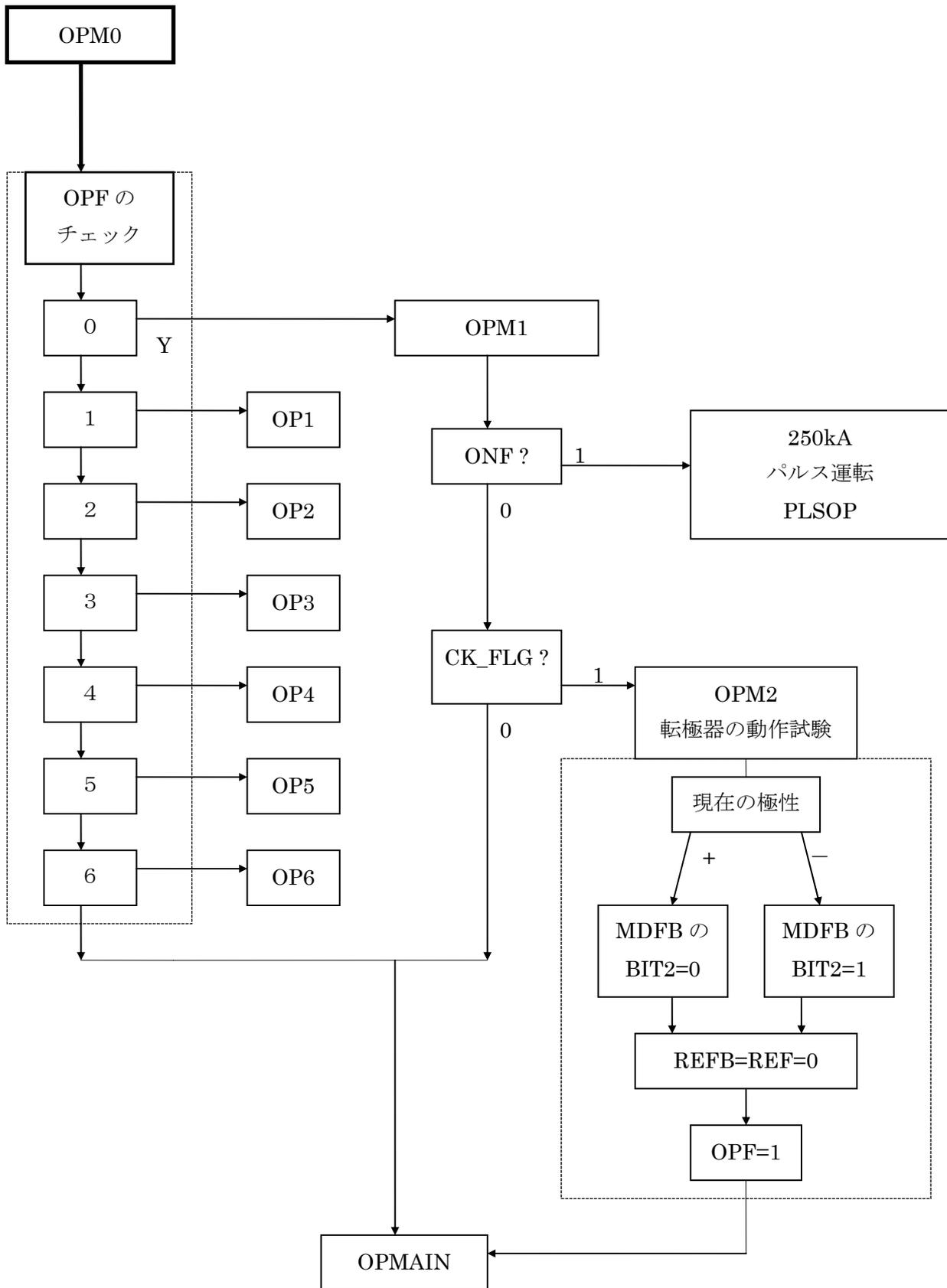
メインループ



備考)

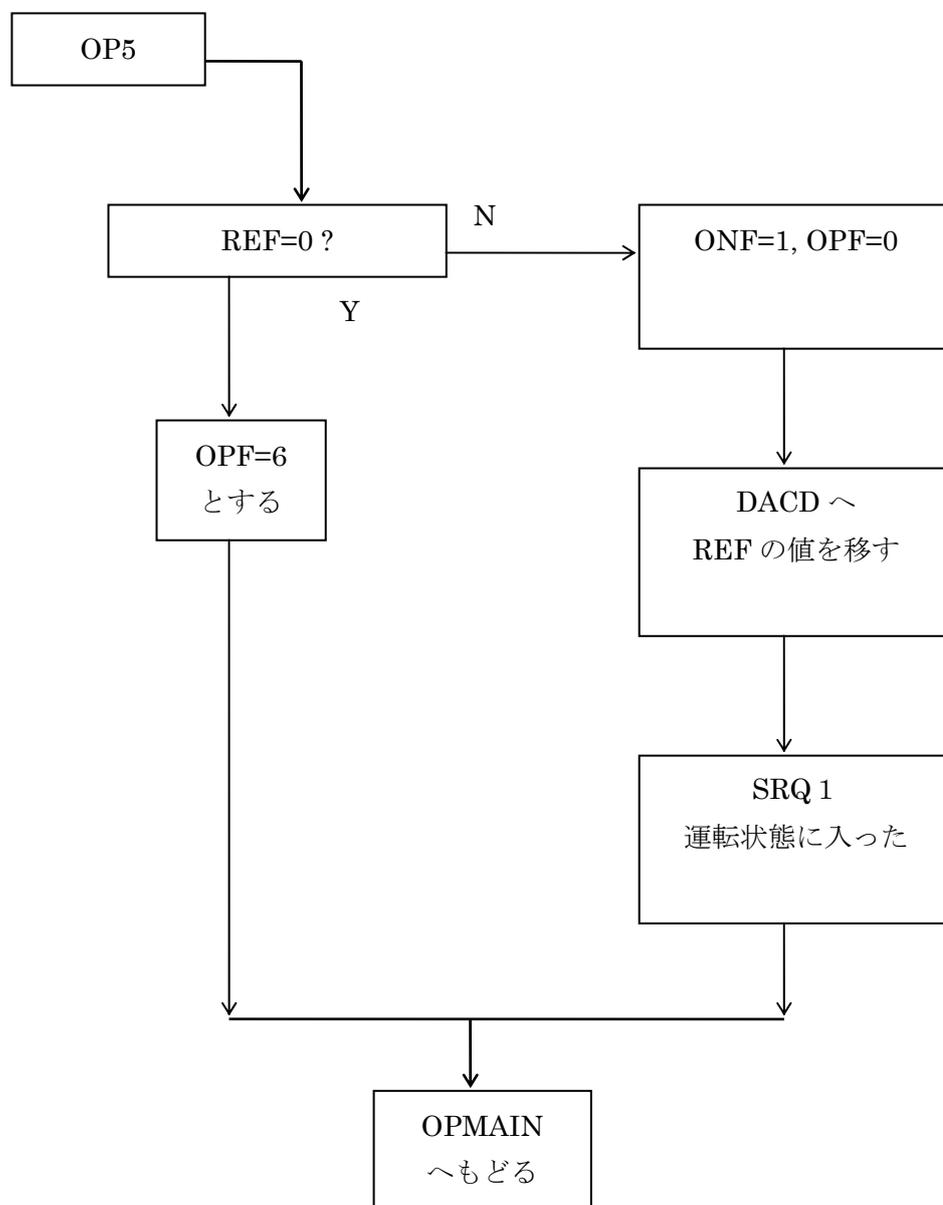
- \* 1. MDFは新しい設定データを GPIB から受け取った時にセットされる (747 行、DSET0)
- \* 2. リセットする理由は新たに設定データの受信をしたことを判断できるようにするため
- \* 3. 運転開始用にデータを移す
- \* 4. 転極器の操作が必要かの判断をする (出力の極性をプラスからマイナスに変更するような場合、いったん電源を停止し、転極器を操作した後に電源の運転を再開する必要がある)。そのために設定データの操作を行う。極性の切り替え操作は OPM0 の中の OP3 で処理される。

3-4. フローチャート2 OPM0 の処理 : ホーン電源、運転操作シーケンス部分



### 3-5. フローチャート3 (OP5の部分)

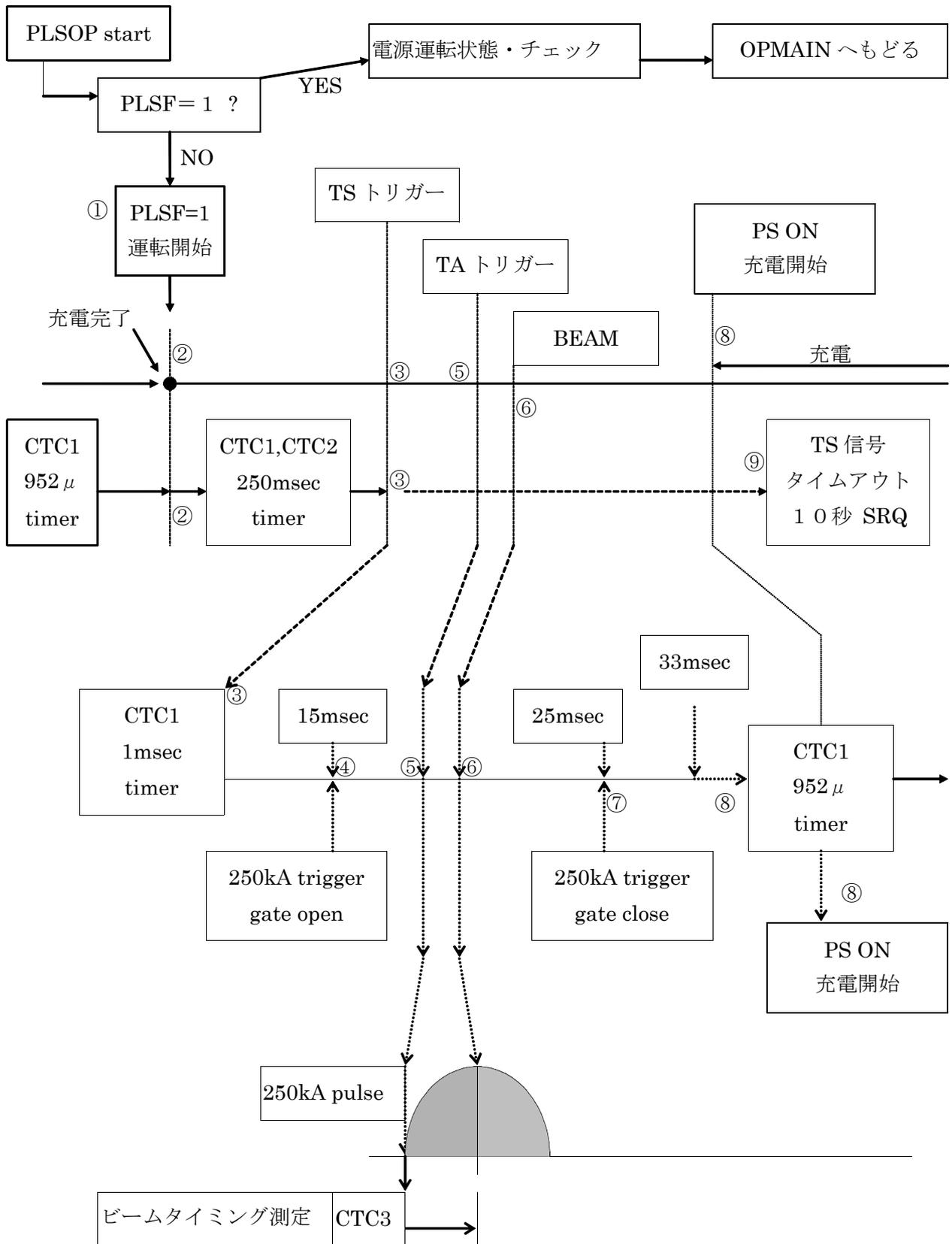
正常にメインコンタクタがONになった時の処置、パルス運転に入る準備を行う



#### 備考

- 以前の電源（通常の）の場合は、ここで、電流設置値(DACD)の上昇、下降の処理を行っていた。パルス電源用に改造された部分である。OPF をクリアーし、ONF を 1 とすることによりパルス運転のループに移る
- DAC アドレス 20H,21H
- 変数 DACD、DACNT、DAC2D、MD、STEP2、ADCY0 データ、BMT
- CALL SETDAC の処理はパルス運転の処理の中で行う

3-6. フローチャート4 パルス運転 タイムチャート



### 3-7. PLSOP の説明 (2秒周期、加速器に同期したパルス運転部分)

#### ① の処理 (パルス運転開始部分)

パルス電源の運転が開始された時と電圧値が変更された時にこの部分の処理に入る。

運転が最初に開始された時は、PLSF (パルス運転のフラグ) を 1 とし、②の処理を実行し、パルス運転に入る。PLSF がすでに 1 の時は、何も処理せずに OPMAIN へもどる。OP5 (電圧設定) の処理において、REF の値が DACD に移されているので、パルス運転の処理において DACD の値は取り込まれて運転される。

#### ② の処理について：充電の完了、又は充電の開始、充電スタートトリガ待ちの状態

処理する事

- ・ CTC1 と CTC2 のタイマーを初期設定する。(CTC1、CTC2 によって運転が進行する時をパルス運転モード 0 (PLSMD=0) とする。

(設定の内容)

CTC1：1 ミリ秒タイマーとする。出力は CTC2 に入力されている。CTC2 はカウンターとして使い、カウントデータとして 250 をセットする。CTC2 の出力は割り込み可能とする。ソフトにより 250 ミリ秒の割り込みをカウントする。時間が 10 秒になった時には PSOFF を実行しコンデンサの電圧を放電させる。但し TS のトリガーは待ちの状態とし、トリガーの受信により、充電を開始し、運転状態に入る。

- ・ PIO の割り込みの設定をする。加速器からの信号 TS を受けるため。PIO のビット 3。立ち下がりエッジ (3 マイクロ秒・パルス)。

#### ③ の処理：TS トリガーを受信

- ・ CTC1,CTC2 のタイマーを停止する。CTC1 を 1 ミリ秒割り込み可能タイマーとしセットする。
- ・ CTC1 タイマーのソフトによるカウントアップ。
- ・ この部分の運転状態を：パルス運転モード 1 (PLSMD=1) とする。
- ・ PIO による割り込みを変更し、TA 信号をソフト的に検出する。PIO ビット 2。TA 信号のタイミングの位置の検査を行うため。

#### ④ PLSMD=1 において 15 ミリ秒後に、250kA パルススイッチのゲートを開とする。

#### ⑤ TA トリガーの受信：

- ・ この信号は直接に 250kA サイリスタスイッチをトリガーする。
- ・ また、CTC3 のタイマーをトリガーしスタートさせる。この CTC3 のタイマーは 250kA パルスとビームの時間関係の検査用です。

#### ⑥ ビーム信号による割り込み：この割り込みにより、CTC3 のタイマーを読み出します。

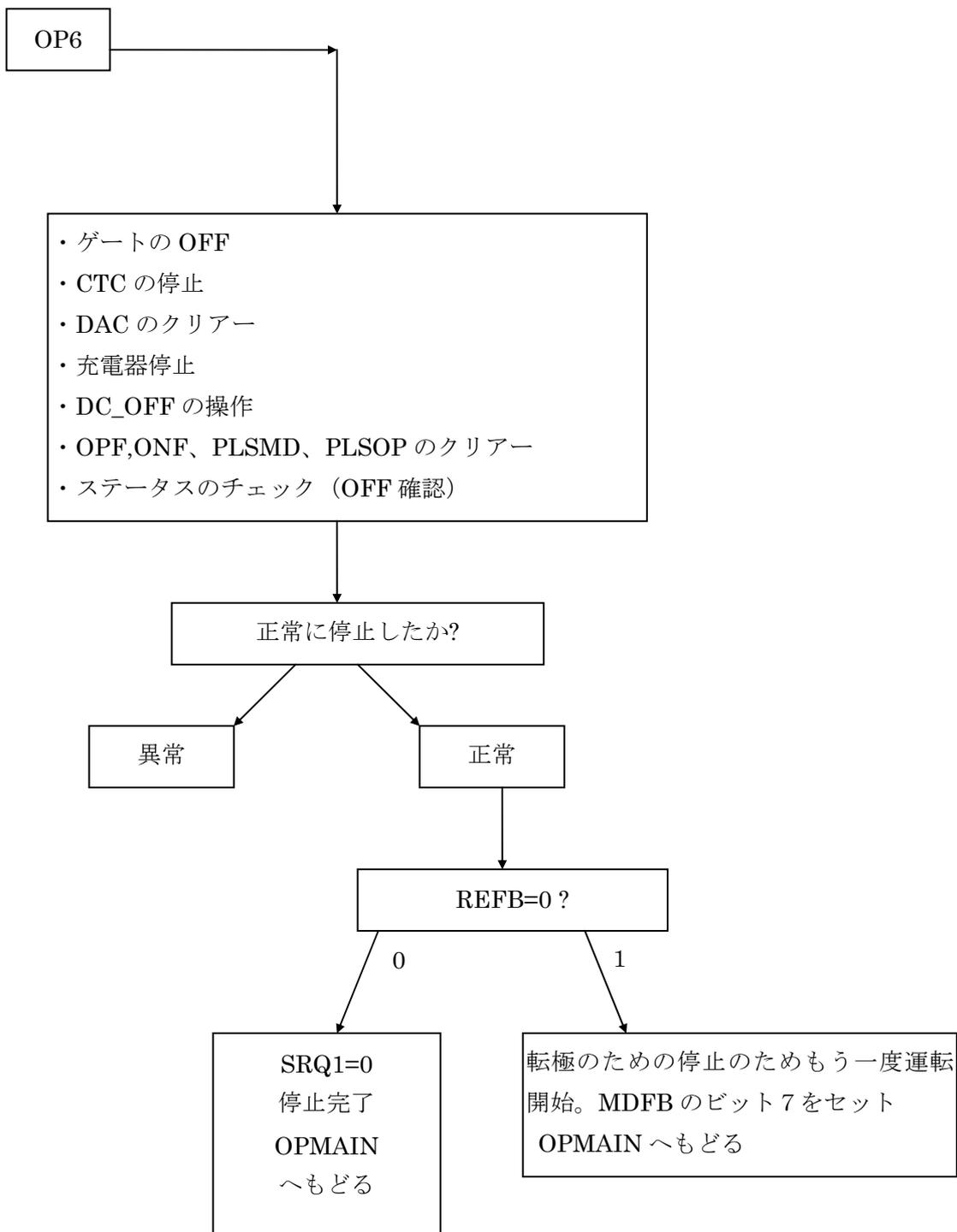
#### ⑦ PLSMD=1 において 25 ミリ秒となった時、250kA パルススイッチのゲートを閉とする。

#### ⑧ PLSMD=1 において 33 ミリ秒となった時、PLSMD=2 となります。

- ・ CTC1 をストップ、再設定します。952 マイクロ秒の割り込みにより、DAC2 の設定を行います。2048 のカウントアップにより、DAC2 の設定は完了、充電完了します。必要時間は 1.95 秒です。

#### ⑨ 1.95 秒経過後、充電完了時には、CTC1 のストップを行い、②の処理を実行します。ループとなります。

### 3-8. フローチャート5 OP6: ホーン電源の停止 (DC OFF) 処理



## 4. 運転記録を振り返って（トラブルの原因、改良）

ホーン電源 1、ホーン電源 2 の K2K 実験での故障記録の一部を表 4-1、表 4-2 に示します。これは、改良の記録でもあります。

2001 年 1 月 14 日の変更: ホーン電源は、一度運転状態に入ると、異常が無い限り、加速器からのトリガー信号により自動運転されます（初期 1999 年から）。ここでのソフトの改良は、加速器がしばらく停止後に運転を再開した時に、以前はホーンのパルス電流がいきなり 250kA で出力されるのを改善し、徐々にパルス電流を増加させる方式に変更しました（プログラムリスト 3357 行）。例えば、設定データ 4700 を受け取った場合、最初のビームに同期したパルス運転の電源電圧の設定は 0、次は 250、次は 500、と 250 ステップで上昇し、4500、最後に 4700 となり、以後加速器が停止するまで設定値 4700 でパルス運転を続行します。加速器が停止すると、12.5 秒後に充電器の停止、コンデンサの電圧を放電させます。ホーン電源は加速器からのトリガー信号（TA）ビームの待ち状態となります。TA 信号が来ると上記の動作（パルス電流が徐々に上昇し、設定値 4700 での運転が再開されます）。

CT アンバランス監視装置は、アナログ回路で演算し、2 秒間のホールドを行っているが、加速器の停止時し、10 分程度トリガー信号（TA）が来ない場合、監視装置は、最後のアナログ値の演算結果をホールドしたままの状態となる。アナログ値を長時間（数分間以上）ホールドすると、数分後にホールド回路のエラーが大きくなり、メタリレー（判定値）の上下限値をオーバーし、ホーン電源のインターロック回路が動作し、停止してしまう（ホーン電流のバランスが正常であるにもかかわらず、ホールド回路のドリフトにより）。これを防ぐために、パルス運転中に 12.5 秒間以上トリガー信号が途絶えた場合は、ホーン電源コントローラが CT アンバランス監視装置のアナログデータをリセットするパルスを発生するように、2001 年 5 月 10 日にソフトの変更を行っています。このトリガー信号はダイオード 2 本により、加速器からの TA 信号と合成（OR）され CT アンバラ監視装置のリセット端子に加えられます。

過去の運転中に時々、過電流のトリップが発生していますが、最近になり、この原因がはっきりと分かりました。この現象、過電流、異常停止についてはその都度、かなり、調べたのですが、異常原因が特定できず、処置できなかつたことです。これは、OP アンプの故障、劣化やノイズの問題ではなく、電気の端子の漏電、汚れ、湿気による絶縁の劣化であることが判明しました。充電器の出力電圧のフィードバック回路へのデバイダ抵抗を固定している絶縁端子と、それを載せている絶縁板の絶縁抵抗の低下です。樹脂製の絶縁端子は特に汚れに弱いです。それらはステアタイト製の物に変更しました。特に高圧のデバイダ抵抗は高抵抗（10M $\Omega$ ）です。高圧回路では、部品の選定が重要であり、定期的な絶縁状況、汚れの点検、整備が不可欠であることがわかりました。

| 1999年    | 平成11年 | K2Kニュートリノビームラインの運転 |                            |       | 処置  |
|----------|-------|--------------------|----------------------------|-------|---|
| 2月24日    |       |                    | パルス電源2のスナバー回路取付(高圧整流ダイオード) |       |   |
| 3月18日    |       | 電源・第二              | SCRスイッチ不良・交換               |       |   |
| 4月9日     |       | 異常無し               |                            |       |   |
| 4月14日    |       | 異常無し               |                            |       | 175kA   |
| 4月15日    |       | ホーン                | 停止                         | 冷却水不足 | 250kA   |
| 4月16日    |       | ホーン                | 修理                         | 第一ホーン | 150, 175kA                                    |
| 4月26日    |       |                    |                            |       |   |
| 4月30日    |       | 電源                 | ヒューズ断                      | 1本    | 175kA   |
| 6月11日    |       | 電源・第二              | 第二                         | 過電流   | 正常復帰  |
| 6月15日    | 14:45 | 電源・第二              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 6月15日    | 16:50 | 電源・第二              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 6月15日    | 19:50 | 電源・第二              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 6月30日    |       | 電源・第一              |                            |       | (SP1003A-103, SW-ON信号を6N137, U1 TP6(LS123)とする |
| 6月30日    |       | 電源・第二              | 改造 2台                      |       | ゲート回路   |
| 6月30日    |       |                    |                            |       |   |
| 7月10日(土) |       | 電源・第一              | アンバランス                     | 過電流   | 点検  |
| 7月11日(日) |       | ホーン                | 断線                         |       | 点検の結果ホーンの断線                                   |
| 7月17日(日) |       | 電源・第二              | 外部異常                       | 冷却水不足 | ポンプ軸受け水漏れ                                     |
| 8月5日     |       | 電源・第一              |                            | 過電流   | ヒューズ交換  |
| 8月11日    |       | 電源・第一              | ファン異常                      |       |   |
| 8月12日    | 12:33 | 電源・第一              | ファン異常                      | 過電流   |   |
| 8月12日    | 14:03 | 電源・第一              | ファン異常                      |       |   |
| 8月19日    |       | 電源・第二              | アンバラ                       |       |   |
| 8月26日(日) |       | ホーン                |                            | 冷却水不足 | 正常復帰 水補給                                      |
| 9月13日    |       | 電源                 | ストリップライン補修                 |       | 第一ホーンCT~トランス部接続調整のため停止8:50~                   |
| 9月16日    | 17:00 |                    |                            |       | 作業完了  |
| 9月16日    |       |                    |                            |       |   |
| 10月13日   |       | 電源・第二              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 10月14日   |       | 電源・第二              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 2000年    |       |                    |                            |       |   |
| 1月13日    | 8:21  | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 1月13日    | 11:25 | 電源・第一              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 1月13日    | 11:40 | 電源・第一              |                            | 過電流   | 正常復帰  |
| 1月13日    |       |                    |                            |       | FB.Opamp交換、<br>FB.CV基板調整、ゲインを落と<br>しハンチングの防止  |
| 1月14日    | 0:49  | 電源・第一              | 調整                         |       | ダンブ抵抗0.4 $\rightarrow$                        |
| 1月14日    | 1:00  | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 1月15日(土) | 9:50  | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 1月15日(土) | 10:23 | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 1月15日(土) | 10:37 | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 1月29日    | 17:03 |                    | 実験終了                       |       |   |
| 2月5日(土)  | 10:33 | 電源・第一              |                            | 過電流   |   |
| 2月14日    | 18:45 | 電源・第二              | SCR故障                      |       | SCR交換   |
| 2月14日    |       |                    |                            |       | ホーンの端子破断                                      |
| 3月1日     | 18:08 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 4月17日    |       | 電源                 | 点検整備                       |       |   |
| 4月18日    |       | 電源・第一              | SCR交換                      |       | SCR出力端子銅板化                                    |
| 5月19日    | 22:36 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 6月18日(日) | 16:25 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 6月18日(日) | 16:40 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 6月18日(日) | 16:45 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 6月21日    | 17:50 | 電源・第一              | CT1下限                      |       |   |
| 7月10日    |       |                    | 内部調査                       |       | アルミ・ブスバーの断線(1枚目)                              |
| 7月14日    | 8:43  | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 8月27日(日) | 11:12 | 電源・第二              |                            | 過電流   |   |
| 9月12日    | 9:30  | 電源・第一              |                            | 過電流   | SCRSW異常あり                                     |
| 9月13日    |       | 電源・第一              | SCR交換                      |       |   |
| 9月14日    |       |                    | horn断線判明                   |       |   |
| 10月13日   | 16:45 | 電源・第一              |                            |       | アルミ・ブスバーの断線(2枚目)                              |

表4-1. 運転記録 1

|          |       |       |               |  |          |
|----------|-------|-------|---------------|--|----------|
| 10月11日   |       |       | ホーンテスト棟(第二電源) |  | 運転開始     |
| 10月18日   | 8:15  | 電源・第一 |               | 過電流  |          |
| 10月18日   |       | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 10月18日   | 8:20  | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 2001年    |       |       |               |  |          |
| 1月14日(日) | 5:47  | 電源・第一 | CTアンバラ        |  |          |
| 1月14日(日) | 20:09 | 電源・第一 | CTアンバラ        |  |          |
| 1月15日    | 2:55  | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月15日    | 7:55  | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月16日    | 16:00 | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月16日    | 23:29 | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月17日    | 6:18  | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月17日    | 10:05 | 電源    | CTアンバラ        |  |          |
| 1月19日    | 17:12 | 電源・第二 | CTアンバラ        |  |          |
| 1月20日    | 20:50 | 電源・第一 | CT全電流         |  |          |
| 1月20日    | 21:10 | 電源・第一 | 上に同じ          |  |          |
| 1月20日    | 21:50 | 電源・第一 | 上に同じ          |  |          |
| 3月2日     | 8:00  | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 3月5日     | 9:30  | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 3月8日     | 17:56 | 電源・第一 | CT            |  |          |
| 3月8日     | 18:10 | 電源・第一 | CT            |  |          |
| 3月9日     | 20:30 | 電源    | CT            |  |          |
| 3月10日(土) | 9:30  | 電源・第一 |               | 過電流  |          |
| 3月10日(土) | 10:25 | 電源・第一 |               | 過電流  |          |
| 3月12日    | 15:12 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
|          | 15:37 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
|          | 16:00 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 3月22日    | 15:10 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 3月23日    | 15:38 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 3月29日    | 19:30 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 4月11日    | 1:15  | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 4月12日    | 14:55 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 4月15日(日) | 13:50 | 電源・第一 |               | 過電流  |          |
| 4月15日(日) | 17:20 | 電源・第一 |               | 過電流  |          |
| 4月25日    | 17:58 | 電源・第二 |               | 過電流  |          |
| 5月7日     |       |       |               | 電力制御回路ON/OFFのゲートブロック回路はリレーにより駆動されていた。この部分をフォトカプラに置き換える |          |
| 5月10日    |       |       | ホーン電源改良       | 1) 1000以上のセット徐々に上昇<br>2) タイムアウト12.5m秒<br>3) 充電区間60m 秒  |          |
| 6月1日     |       | 電源    | CT            |  |          |
| 7月1日     | 13:05 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月1日     | 14:25 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月1日     | 14:51 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月1日     | 15:03 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月1日     | 15:24 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月1日     | 15:45 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月4日     | 12:50 | 電源・第一 | Fan           |  |          |
| 7月7日     | 7:00  | 電源・第一 | CT            |  |          |
| 7月12日    |       |       | 異常なし          |  |          |
| 7月13日    |       |       | 調整 運転         |  |          |
| .        |       |       |               |  |          |
| .        |       |       |               |  |          |
| .        |       |       |               |  |          |
| .        |       |       |               |  |          |
| 2004年    |       |       |               |  |          |
| 11月6日(土) | 6:30  | 電源・第一 | 異常停止          | 過電流  | ホーン点検調査要 |
|          |       |       |               |  |          |
|          |       |       |               |  |          |
|          |       |       |               |  |          |

表4-2. 運転記録 2

## 5. J-PARC ニュートリノビームラインでの再出発

現在、東海 J-PARC でニュートリノビームラインの建設が進行中です。つくばでニュートリノ K2K 実験に使用されたパルス電源 2 台は、この J-PARC で再度使用するために準備中です。発生パルス電流は 320kA です。パルス変圧器は 250kA 時に 1 テスラの設計ですので、320kA 時に 1.28 テスラであり、まだ鉄心の飽和には余裕があります。ただ、導体の発熱 (3kW 程度) については水により冷却します (2 次導体には水冷用の銅パイプが組み込まれている)。充電器はコンデンサの充電時間が加速器の運転周期に連動し 2 秒から 3 秒に延びますので、逆に余裕が生じます。サイリスタスイッチについては、サイリスタの定格[電流 2 乗時間積 : A<sup>2</sup>s] :  $1.8 \times 10^7$  で余裕があります。また、臨界オン電流上昇率も 300A/ $\mu$ s で余裕があります。

J-PARC でのパルス電源の運転とメンテナンスについては、K2K で十分に虫だしが済んでいますので、新規にパルス電源を製作した場合よりも良好な運転が維持できると期待されます。もちろん、パルス電源は再利用ですから、建設費は～億円の単位で節約できます。

## 6. 参考文献

1. Magnet Power Supply and Beam Line Control for secondary Beam Line K6, Y. Suzuki, et al. (ICALEPCS'91, JAPAN, Tsukuba)
2. Improvement of  $\pi 2$  Beam Line Control, Y. Suzuki, et al. The 9<sup>th</sup> Symposium on Accelerator and Technology, Tsukuba, Japan 1993
3. 計測技術(GPIB), 技術部職員専門課程研修 (平成 9 年度) KEK Internal 97-20. GPIB の応用
4. Control and Timing of the 250kA Pulse Magnetic Horn, Y. Suzuki, et al. ICALEPCS'97, CHINA, Beijing. Section 5. P266-268.
5. ニュートリノビームライン 250kA パルス電源, 鈴木善尋 他. KEK Proceedings 99-20. P78-96.
6. The Neutrino Beam line control system, Y. Suzuki, et al. ICALEPCS'99, Trieste, Italy. Proceedings P104-106.
7. ニュートリノビームラインのコントロールシステム, 鈴木善尋. 技術研究会報告、分子科学研究所. No.16 P384-387.
8. コンピュータによる電磁石電源の維持管理, 鈴木善尋. 平成 14 年度技術交流会. KEK Proceedings 2003-4. P18-27.
9. BEAM LINE CONTROL AND DATABASE, Y. Suzuki. Proceedings of PCaPAC2005, Hayama, Japan. KEK2005-18. WEP49.
10. ビームラインの制御とデータベース, 鈴木善尋. 平成 16 年度. 大阪大学総合技術研究会. Proceedings. P2-14.

# ニュートリノビームライン用電磁ホーンシステム

山野井豊

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所・ビームチャンネルグループ

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

ニュートリノビームライン用電磁ホーンシステムは、長基線ニュートリノ振動実験（K2Kのある筑波と神岡間を結んで実験を行なうため“K2K実験”と呼ばれる。）のためのニュートリノ収束装置である。K2K実験は、筑波のKEK 12 GeV陽子加速器で加速された陽子を用いて人工ニュートリノを発生させ、250 km離れた岐阜県神岡に設置されている5万トンの水チェレンコフ検出器（スーパーカミオカンデ“SK”）で、これを検出することによりニュートリノ振動現象を確認する実験である。

電磁ホーンシステムは、この実験においてより多くのニュートリノをスーパーカミオカンデに収束させる働きをする。

のである。その過程は、12 GeV陽子シンクロトロンを用いて光速の99.7%まで加速された陽子を取り出し、約120台の電磁石群を用いておおよそ神岡の方角へこの陽子を輸送する。更に、この陽子を約66 cmのアルミニウム標的に照射し、パイ中間子を大量に発生させる。このパイ中間子の生成と神岡への高精度な収束を本電磁ホーンと呼ばれる装置のなかで行なう。

次に、このパイ中間子がミュー型ニュートリノとミュー粒子に壊変するのを約200 mのヘリウムガスの充填された崩壊トンネル中で行なう。このようなステップを踏むことで射出時刻の判っている人工ミュー型ニュートリノが250 km離れたスーパーカミオカンデに0.00083秒後に到達する。

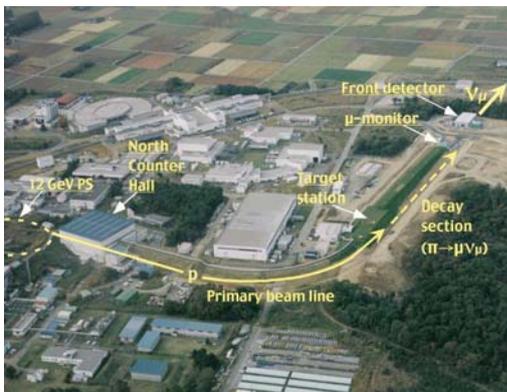


図1 K2Kニュートリノビームライン

## 電磁ホーン収束装置

電磁ホーンは、円錐と円筒のアルミニウム合金の電気導体から成っている。この実験で使用される電磁ホーンは2台を直列に置き使用し、上流側に設置される第1ホーンは外形700 mm・全長2371 mm、下流の第2ホーンは外径1650 mm・全長2760 mmの大きさである。共にアルミニウム導体に大きなパルス電流を流し、二重導体の中空部分にのみ、トロイダル状の強力な磁場を発生させている。

K2Kホーンの特徴として、中心電流導体部が標的となっていることが挙げられる。この内部導体の周りに発生する磁場（最大3.3テスラ）を利用して、アルミニウム標的で発生したパイ中間子を曲げ、次に崩壊生成されるニュートリノを神岡に向けて収束させる。

2台の電磁ホーンとも生成したパイ中間子が導体を通過する際に損失してしまうのをより少なくするため薄いアルミニウム合金で作られている。また、より収束性能を上げるために250キロアンペアーのパルス電流を通电して使用するため、直径30 mm長さ660 mmのアルミニウム標的やそれに肉薄3 mmの電気導体部分では密度の大きいジュール熱が発生する。そのため、常時、内部は霧状に冷却水を噴霧することで繰り返し発生する熱による金属疲労、強度の低下を防いでいる。

本発表では、ホーン電磁石設計にあたって行った磁場形状の最適化、構造強度の設計、運転して分かったパルス励磁による振動や表面の酸化・腐食現象、pH制御とトリチウム処理の問題などを紹介する。

## はじめに

K2K実験は、ビームラインの建設、ビームライン要素装置の設計が1997年から始まった。実験は、1999年1月31日に始まり、同年6月19日に最初のニュートリノ事象の検出を行ない、現在（2002年12月）までに56事象のニュートリノが検出されている。ニュートリノ振動現象が起きないとしたときの推定値80.6事象に比べ実際に検出された事象が少ない結果から、ニュートリノ振動現象が起きている確率が約95%であることを意味し、これはニュートリノと呼ばれる素粒子が0でない有限の質量を持つことを示す有力な結果となっている。

この実験で用いられるニュートリノ粒子は、すべてつくば側で加速器によって人工的に作られたも

# K2K MAGNETIC HORNS

AUGUST 1999 ~ FEBRUARY 2003

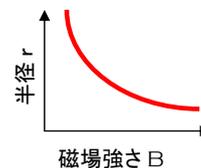
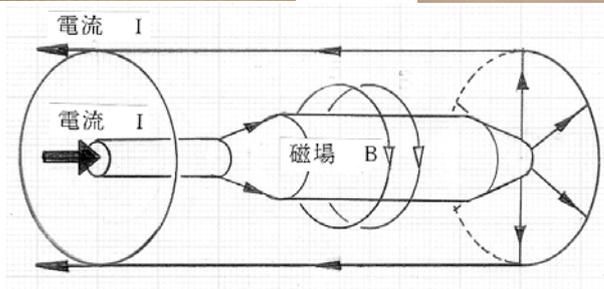
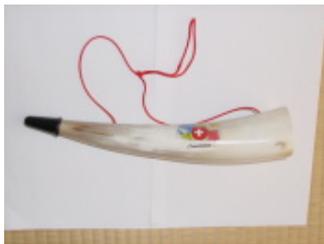
山野井 豊、鈴木 善尋

BEAM CHANNEL GROUP, KEK-PS



Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## MAGNETIC HORN

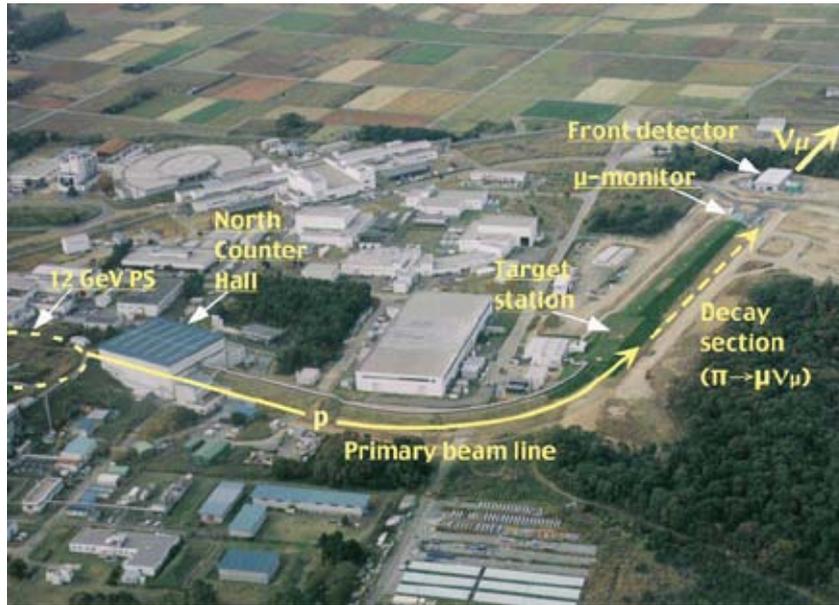


$$\text{トロイダル磁場 } B [T] = \frac{I [A]}{5r [m]} \times 10^{-6}$$

$$B = 5.0 T, r = 10 \text{ mm}, I = 250 \text{ kA}$$

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

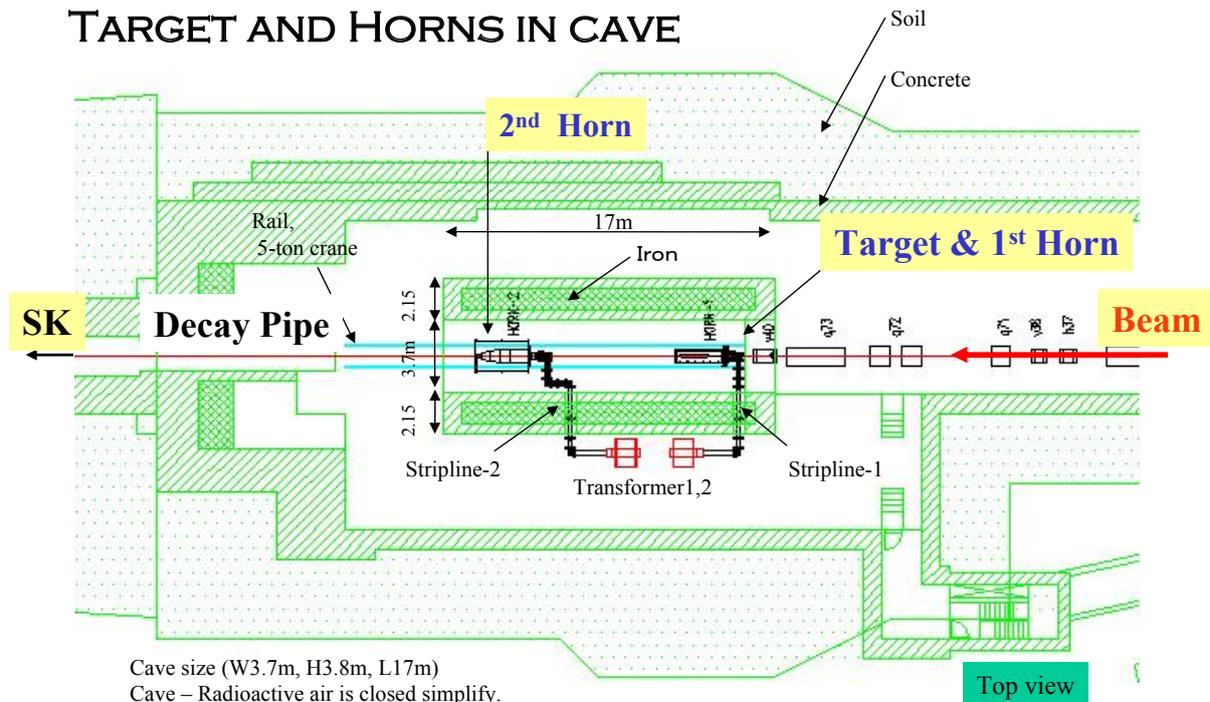
## K2K NEUTRINO BEAM LINE



1999年 1月30日よりビームライン運転開始  
 1999年 3月 3日より電磁ホーン運転開始

Y. YAMANOI — KEK FEBRUARY 4, 2003

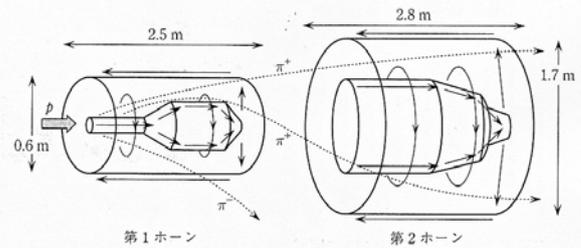
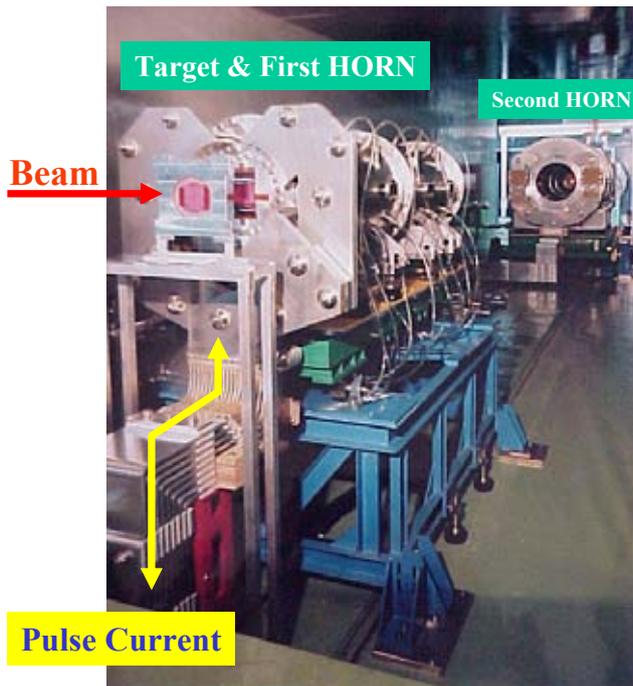
## TARGET AND HORNS IN CAVE



Cave size (W3.7m, H3.8m, L17m)  
 Cave – Radioactive air is closed simplify.  
 Both transformers is set inside beam line.  
 Stripline-1 : 9.3m, (Cross section t15mmx320mm)  
 Stripline-2 : 12.0m, (Cross section t15mmx320mm)

Y. YAMANOI — KEK FEBRUARY 4, 2003

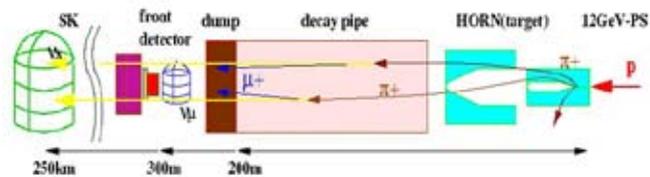
## TARGET AND HORNS LAYOUT



- Built-in production target ( $\phi$  30mm)
- (Blue) removable train:
  - A distance between horns is about 8.06 m.
- (Green) adjustment table:
  - Decline to Super-Kamiokande with  $1.05^\circ$
  - Accuracy is equal to about 0.04 mrad.
- Operation current 250k amp. at both horns
- High pulsed current 2.5ms width, 2.18s cycle
- Total joule's heat=7740 kcal/h

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

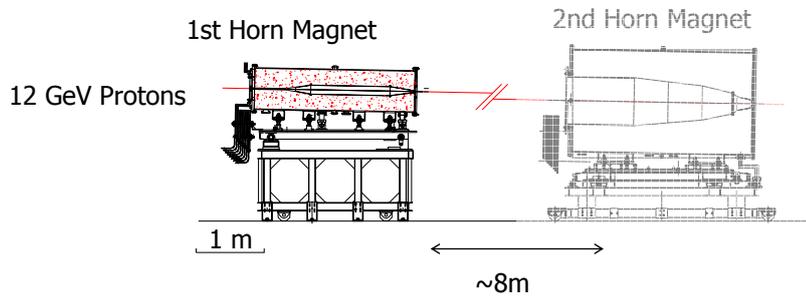
## 収束レンズとしての仕様



- SKで観測されるニュートリノフラックスを最大にする
  - ターゲット近傍で強い磁場を発生することが必要。
  - ホーン導体自身を通過する $\pi$ フラックスの減衰を抑える。
- 出射方向の高精度制御機能
  - $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
  - $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
  - 1ミリ rad以下の軸方向精度
- 耐衝撃荷重、耐熱疲労
  - 1000万回以上の繰り返し荷重、温度変化に耐え得る。
- 耐放射線性と作業者の被曝低減化
  - 無機材質で構成、簡単な着脱設置方法。

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

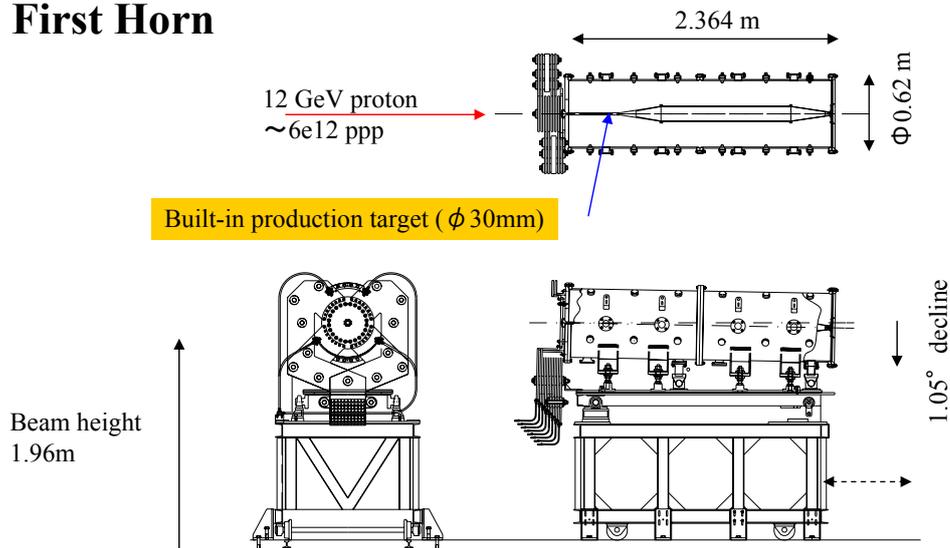
## Horn Magnets for Pion Focusing



- Tandem horn system (1st horn+2nd horn)
- Operation current 250kAmp at both horns
- High pulsed current 2.5ms width, 2.18s cycle
- Total joule's heat=7740 kcal/h

Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

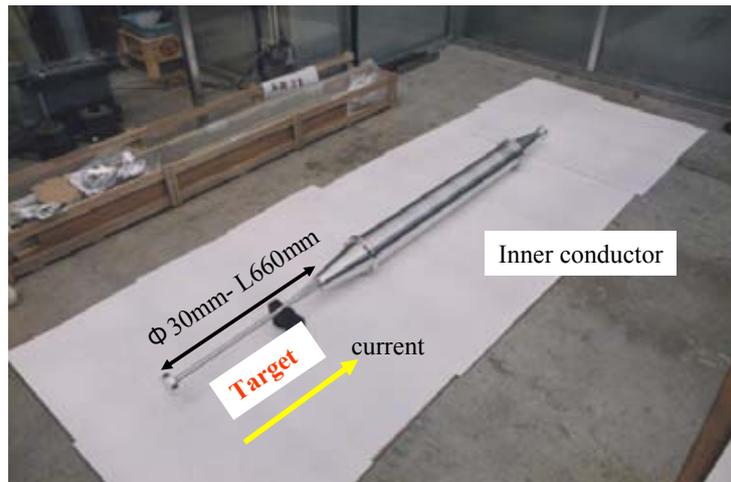
## First Horn



- 12GeV PS cycle=2.18 s
- Built in target (Φ 30mm-L660mm)
- Operation current 250 kAmp
- Thermal load total 14.4 kJ/pulse (6.6 kW)  
(Joule's heat) 12 kJ/pulse, (incident beam) 2.4 kJ/pulse
- Water spray cooling on target and inner conductor (4x6=24 nozzles, 300kPa)
- For minimize  $\pi$  absorption: Aluminum alloy conductor (A6061)

Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

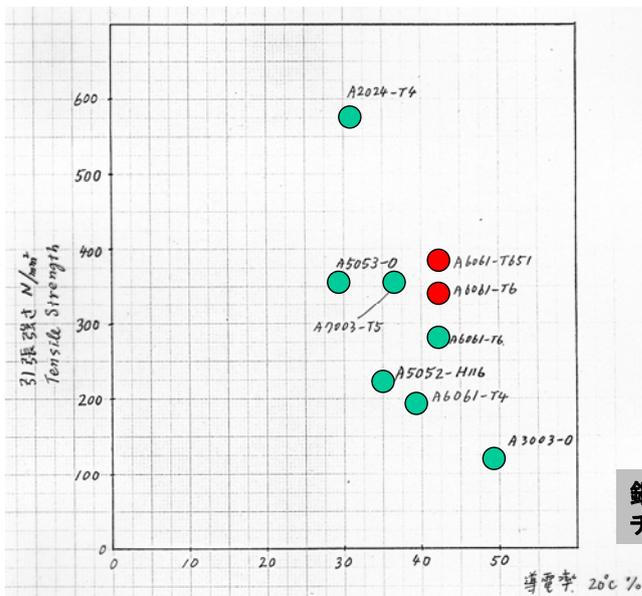
# Inner conductor and Target



- Target rod, thin wall cylinder, tail cone
- Pulse current passes through on the target.
  - Conductive target
- Aluminum A6061,  $\phi 30\text{mm}$ -L660mm,  $\sim 1.67 \times \lambda_1$
- Joule heat 3.8kJ/pulse
- Spray cooling  $\sim$  Heat transfer rate  $1100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
- $T_{\text{average}} \sim 60^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T \sim 15^\circ\text{C}$

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## アルミ合金の導電率と強さ



- 低嵩密度
- 高導電率
- 高強度

| 合金の種類     | 導電率 (20°C) (%) | 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> ) | 疲れ強さ (10 <sup>7</sup> 回) (N/mm <sup>2</sup> ) | 切欠疲れ強さ (10 <sup>7</sup> 回) (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------|---------------------------|---|---|
| 2024-T4   | 30             | 575.3                     | 119.6   | 93.1  |
| 3003-O    | 50             | 125.4                     | 63.9  | 33.3  |
| 6052-H116 | 35             | 229.3                     | 127.4   | 51  |
| 5083-O    | 29             | 355.7                     | 149   | 50  |
| 6061-T4   | 40             | 282.9                     | 115.6   | 58.8  |
| 6061-T6   | 43             | 282.2                     | 129.4   | 63.7  |
| 7003-T5   | 37             | 359.7                     | 144.1   | 52.9  |
| 7005-T6   | 35             | 437                       | 173   | 95  |

表 3.1: アルミ合金の機械的性質  
 中の値は押出材の場合。炭素材の強度はこれらの値の約 0.91 倍である。

Cu 17.241 mΩ·m を 100% とする,

6061-T6 43% 345 } actual value  
 6061-T651 37% 379 } at mill sheet

銅、鉄、SUSは嵩密度が大きい。  
 チタンは導電率が小さい。

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

# 形状の最適化

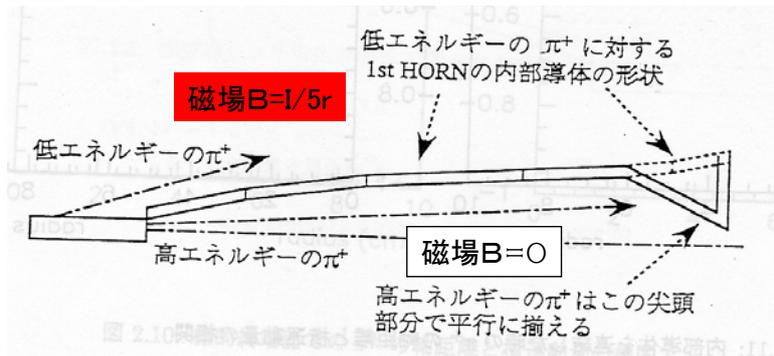
## 標的と磁場領域の関係

低エネルギーの  $\pi^+$  (広がりが  $20^\circ$  付近) まで収束させたい。

- 標的の直近に磁場が必要
- ホーンの中に標的を置く
- ターゲットを電流導体とする

アンダーベンドして行く  $\pi^+$  とオーバーベンドする  $\pi^+$  を共に前方へ揃える。

→



Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

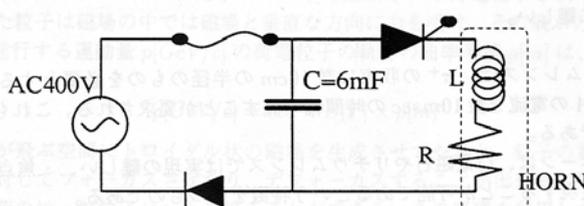
## 外部導体の形状

標的を出来るだけ発熱させない。

→ インダクタンス  $L$ 、抵抗  $R$  を小さくして、通電時間を短くする。

円筒の加工を考慮する。

→ 最低限必要な外形サイズにする。



$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{q}{C} = 0$$

$$I(t) = \frac{Q_0}{\omega LC} e^{-\alpha t} \sin(\omega t)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2 > 0 \quad \text{oscillatory case}$$

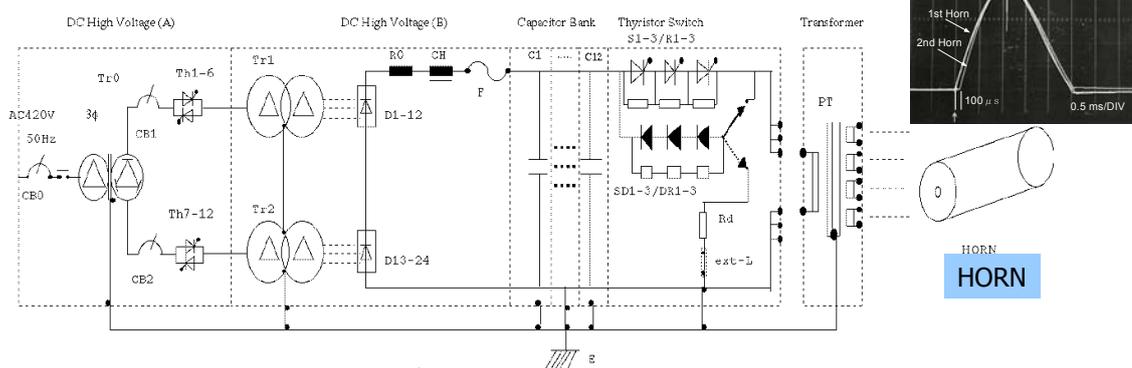
$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_{\text{外径}}}{r_{\text{内径}}} \quad [H/m]$$

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## ホーンの電気的特性

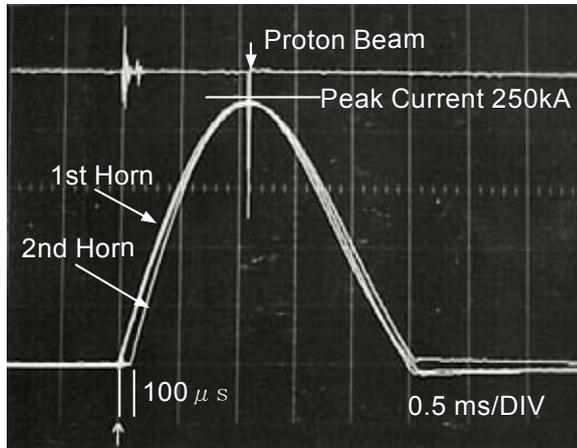
|                  | 1st HORN             | 2nd HORN            |
|------------------|----------------------|---------------------|
| Inductance       | 1.03 $\mu$ H         | 0.618 $\mu$ H       |
| Resistance       | 187.1 $\mu$ $\Omega$ | 29.8 $\mu$ $\Omega$ |
| Pulse width      | 2.5 ms               | 2.4 ms              |
| Peak voltage     | 590 V                | 450 V               |
| Excitation cycle | 2.1 s                | 2.1 s               |
| RMS current      | 5590 A               | 5590 A              |

## Power Supply



- Peak Current =250kA peak, Pulse Width =2.5ms
- Capacitor (500  $\mu$  F/unit) : 7 units @1<sup>st</sup> Horn, 8 units @2<sup>nd</sup> Horn
- Thyristor Switch (1.2kV, 3000A) : 3 units in Series
- Transformer Ratio =20:2

## Incident proton beam and pulsed current



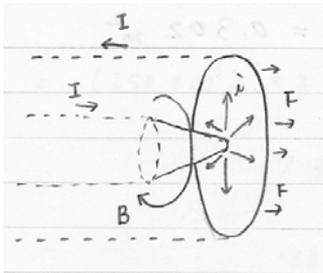
- The current of 2<sup>nd</sup> horn was delayed 100 μs for synchronizing with the incident beam.

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

### 終端円盤の形状

通過する $\pi^+$ を沢山通す。  
→物質量を減らす。薄くする。

撓む内部導体を確実に支える。  
→剛性を確保しつつ、広がろうとする電磁力を抑える。



$$\text{current density: } i(r) = \frac{I}{2\pi r t}$$

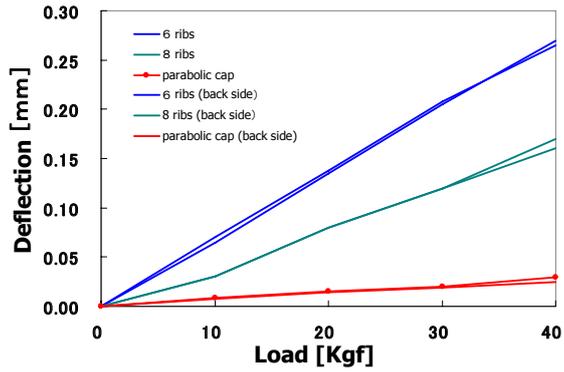
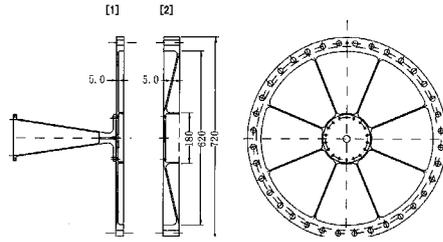
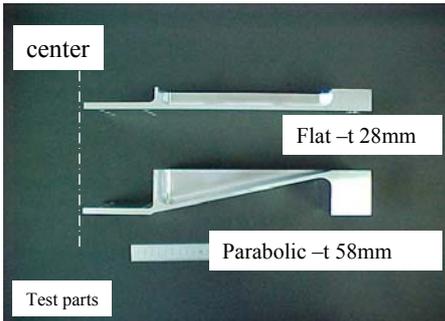
$$\text{magnetic field: } B(r) = \frac{2\mu_0}{4\pi} \frac{I t - z}{r t}$$

$$\text{pressure: } F(r) = \int_0^t i(r) B(r) dz = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I^2}{2\pi r^2}$$

合計27kN @ 外径620mm、内径80mm、厚さ5mm

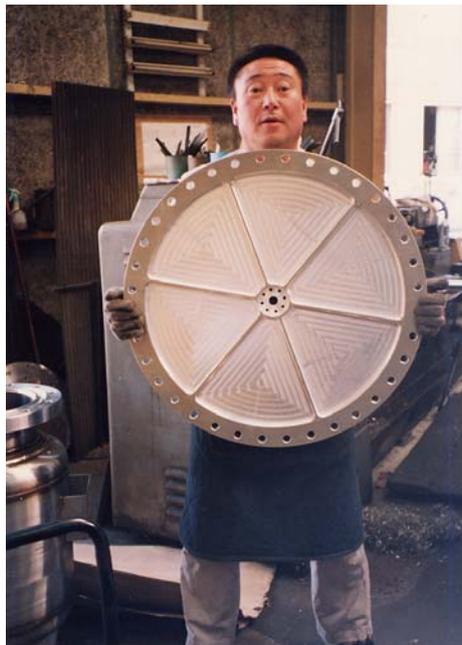
Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## The new disk for supporting inner conductor firmly



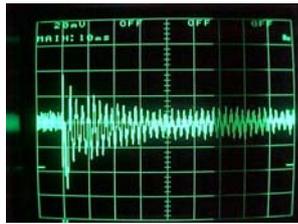
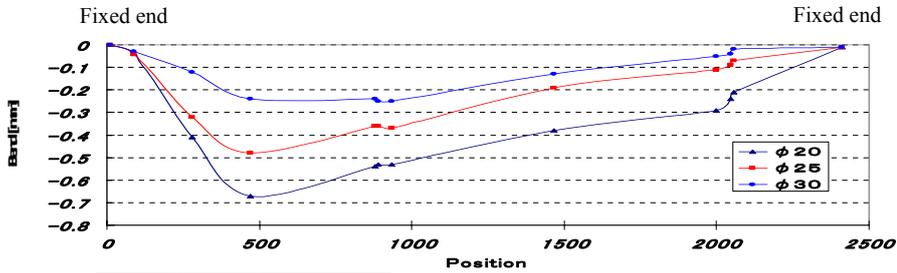
- Spring constant up
  - Flat 8 ribs disk =  $30 \mu\text{m/kgf}$
  - New parabolic disk =  $9 \mu\text{m/kgf}$

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003



1996年2月撮影

# Bending & Vibration



Bending displacement  $\delta$  ( $\mu\text{m}$ )=240, 480, 670

Measured frequency spectrum (FFT);  
195, 437, 928, 1572, 2188 Hz, ...

Longitudinal frequency:  $f_n = \frac{n}{4L} \sqrt{\frac{Eg}{\rho}}$ ,  $f_1 = 1673 \text{ Hz}$

Twist frequency:  $f_n = \frac{n}{4L} \sqrt{\frac{Gg}{\rho}}$ ,  $f_1 = 1027 \text{ Hz}$

Bending frequency:  $f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EIg}{\rho}}$ ,  $f_1 = 207 \text{ Hz}$

Calculation:

Excitation pulse = 195.3 Hz

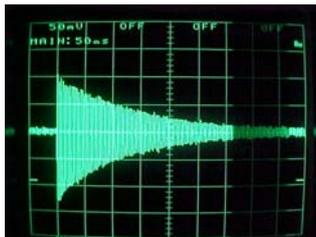
Longitudinal = 1673, 3346, 5019, ...

Twist = 1027, 2055, 3082, ...

Bending = 207, 827, 1861, ...

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

# Measurement of dumping time



Flat disk with 8 ribs



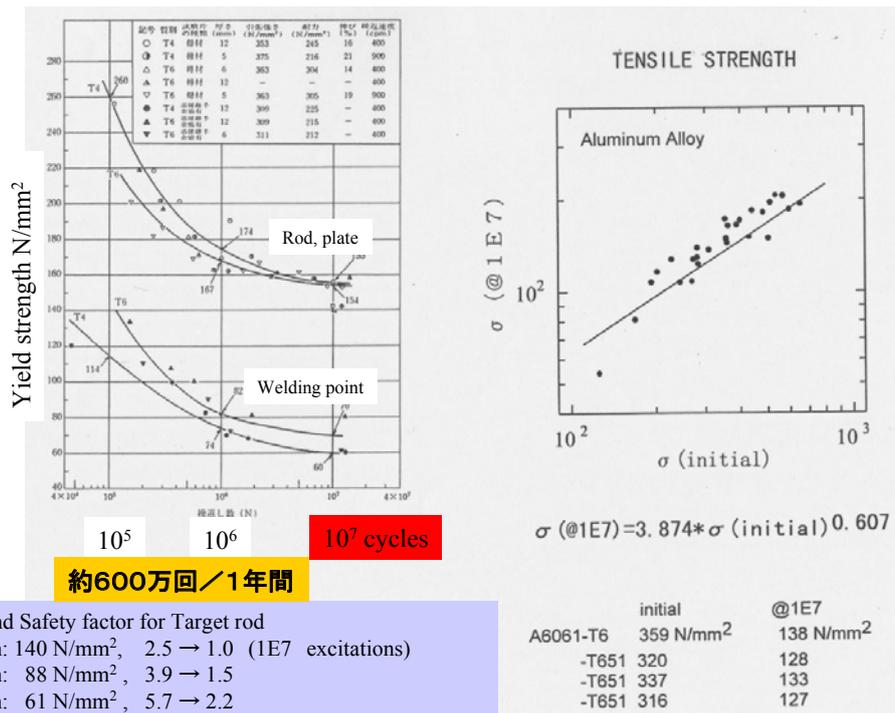
Parabolic disk with 8 ribs

Result:  
1/2 decay time constant : 96ms → 19ms  
Dumping time was able to be suppressed.

- Un-contacting Photoelectric Sensor with laser light beam
- Resolution 1.5  $\mu\text{m}$ , response time 0.15ms

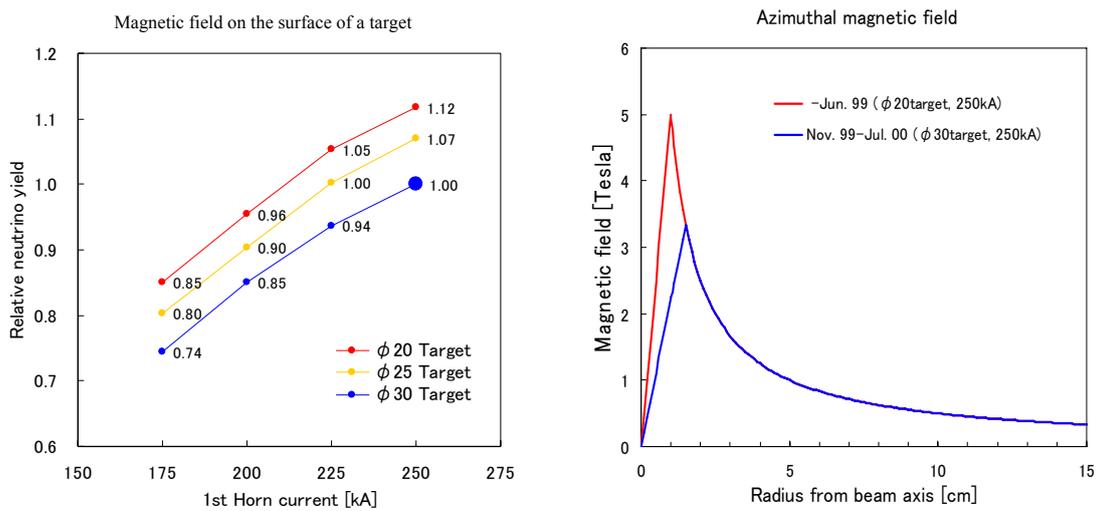
Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

# アルミ合金の耐力の低下



Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

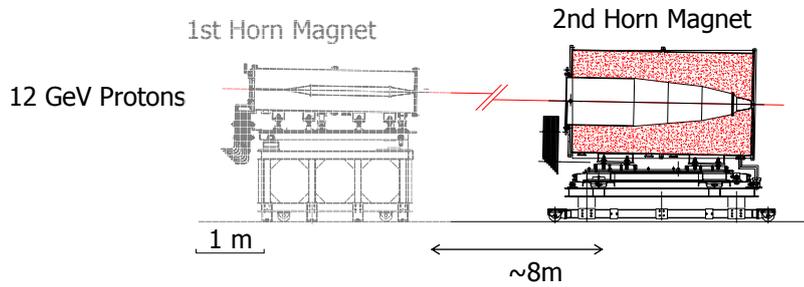
# Neutrino flux with Horn current



The magnetic field on the surface of a target is strengthened.  
 → Neutrino yield increases. But ...

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

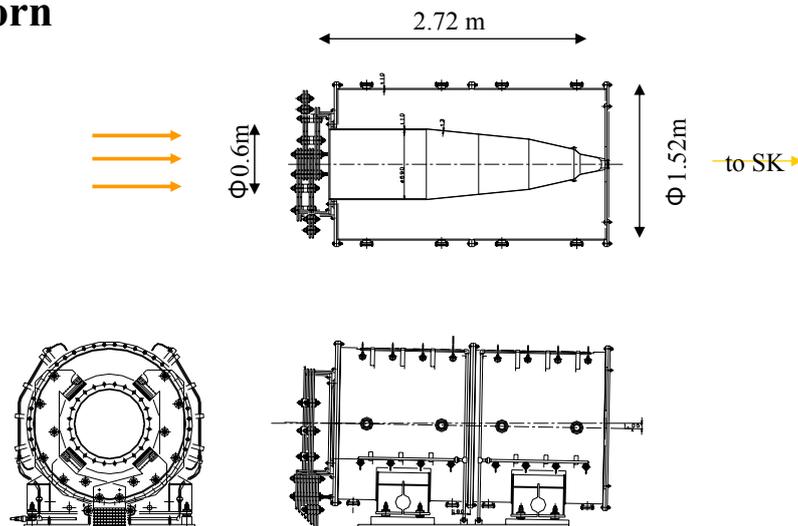
## Horn Magnets for Pion Focusing



- Tandem horn system (1st horn+2nd horn)
- Operation current 250kAmp at both horns
- High pulsed current 2.5ms width, 2.18s cycle
- Total joule's heat=7740 kcal/h

Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

## Second Horn

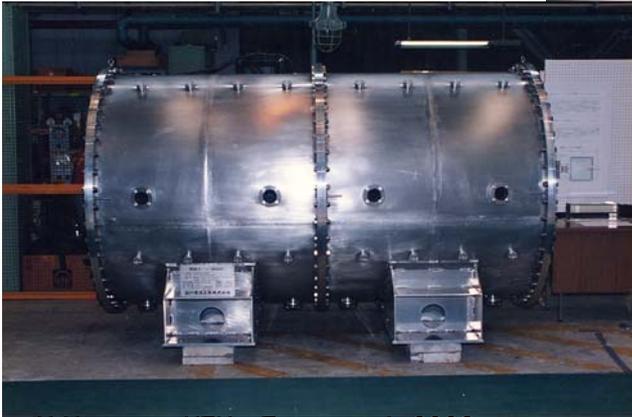


- Length 2.72 m, Outer diameter 1.52m
- Large acceptance
- Conical inner conductor: thickness 3mm, welding joint
- The inner conductor was assembled in the center within a accuracy of  $\pm 3\text{mm}$ .
- For minimize  $\pi$  absorption: Aluminum alloy conductor (A6061)
- Water spray cooling on target and inner conductor

Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

## 内部導体の成型

- 偏芯度: 1.25mm/L2.7m以下
- 真円度: 2.5mm/ $\phi$  1.65m以下



Y. YAMANOI-KEK FEBRUARY 4, 2003

- 偏芯度: 2.5mm/2.7m以下
- たわみ: 0.5mm/L2.7m以下
- 組み合せての同軸度:  
±3mm/L2.7m以下



## 内部導体の発熱

第1ホーン: ビーム発熱=4.40kW @ $6 \times 10^{12}$ ppp

ジュール熱=3.81kW @250kA

1. 33kW(ターゲット部) 7.9A/mm<sup>2</sup>

0.33kW(円錐部)

1.29kW(円筒部) 4.4A/mm<sup>2</sup>

0.86kW(円錐部)

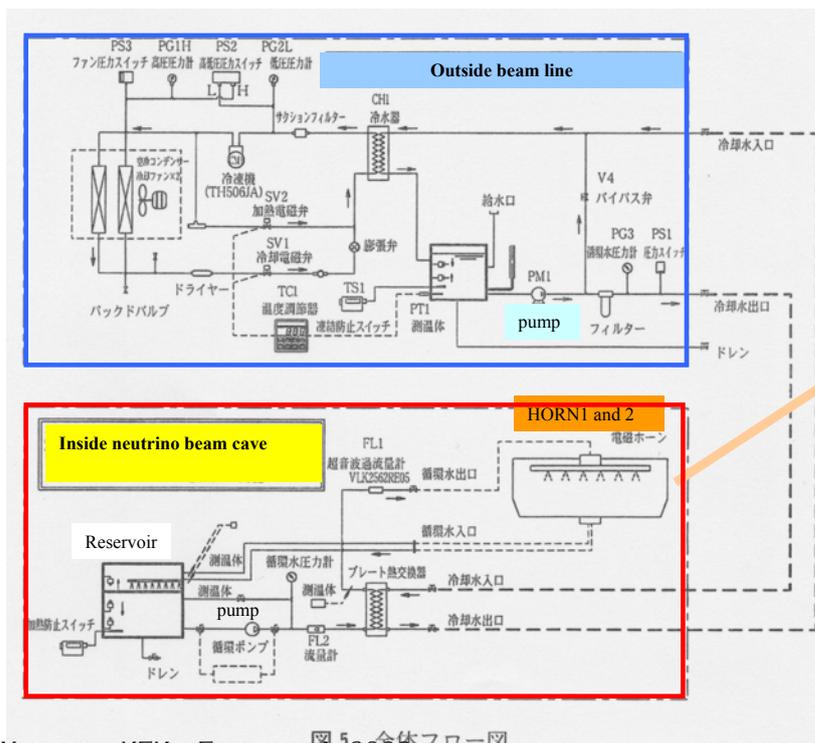
第2ホーン: ジュール熱=0.78kW @250kA

0.26kW(最下流円錐部) 5.8A/mm<sup>2</sup>

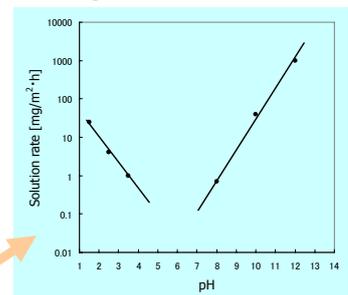
冷却負荷=8.99kW(=2.15kcal/h)

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## Spray cooling system



pH v.s. Solution rate



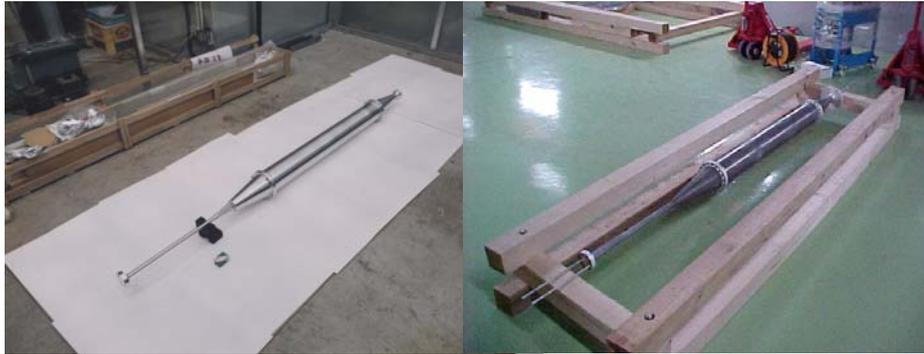
- Spray pressure = 300kPa
- Total flow = 60 lit./min.
- Floating ion:  $[Al(H_2O)_2(OH)_4]^-$
- pH control  $\approx$  7.5
- Conductance  $\approx$  50  $\mu$ S/cm
- Self healing
- Corrosion  $\leftrightarrow$  Alumite growth
- Neutralize of cooling water every 2 weeks

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003 図5. 全体フロー図

# Alumite growth

New

1 year used

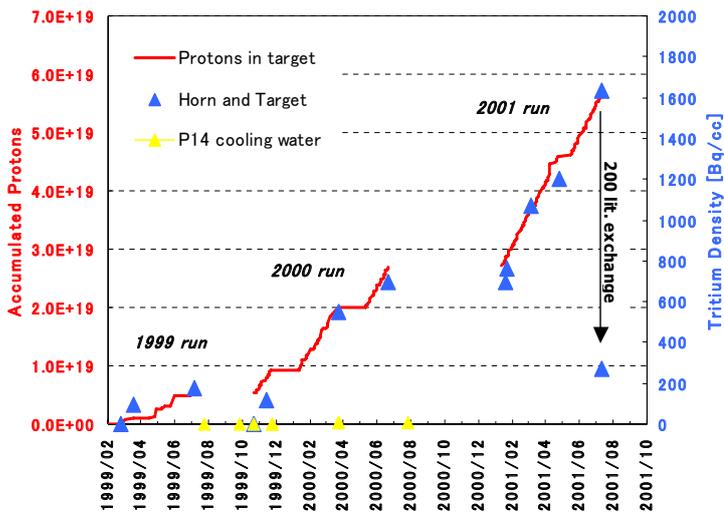


- (Silver color): Ag-coating 5~8  $\mu$ m
- (Black alumite growth): No coating

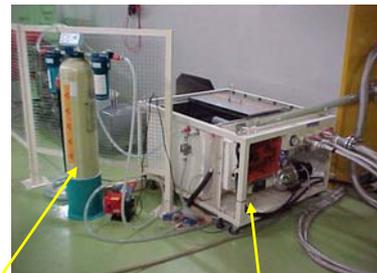
Y. YAMANOI—KEK FEBRUARY 4, 2003

# Tritium accumulation

Accumulated Tritium in cooling water



Dirty cooling water=270 liter  
 Major isotope products  
 H-3, Be-7, Na-22, V-48,  
 Mn-52, Mn-54, Co-56,  
 Co-57, Co-58, Zn-65, Y-88,  
 Tritium density=1633 Bq / cc  
 (2.96E+19 incident protons)  
 Eliminator: Ion Exchange Resin  
 (AMBERLITE)  
 IR120 Na (cation)  
 IRA410 Cl (anion)



Eliminator unit

Reservoir,  
Pump unit

Y. YAMANOI—KEK FEBRUARY 4, 2003

## Effect of Ion exchange resin eliminator

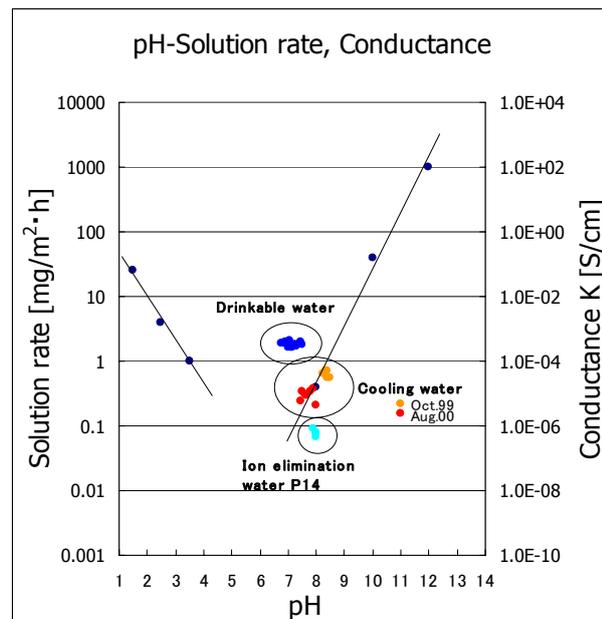
| Isotope | Half-life | Radioactivity concentration(Bq/cc) |           | removal rate % |
|---------|-----------|------------------------------------|-----------|----------------|
|         |           | before                             | after     |                |
| H-3     | 12.3 y    | 9.40e+2                            | 9.89e+2   | ---            |
| Be-7    | 53.3 d    | 1.15e+2                            | 1.17e-1   | 100            |
| Na-22   | 2.6 y     | 9.85e-1                            | 1.44e-3   | 100            |
| Sc-46   | 83.8 d    | 7.46e-1                            | 8.23e-3   | 99             |
| Mn-52   | 6.0 d     | 3.11e+0                            | no detect | 100            |
| Mn-54   | 312.1 d   | 1.87e+0                            | no detect | 100            |
| Co-56   | 77.2 d    | 1.74e+0                            | 4.47e-3   | 100            |
| Co-57   | 271.7 d   | 2.46e+0                            | 7.20e-4   | 100            |
| Co-58   | 70.9 d    | 8.49e+0                            | no detect | 100            |
| Fe-59   | 44.5 d    | 1.49e-1                            | no detect | 100            |
| Co-60   | 5.3 y     | 2.47e-1                            | no detect | 100            |
| Zn-65   | 244.3 d   | 3.53e-1                            | no detect | 100            |
| Se-75   | 119.8 d   | 1.69e-1                            | 3.04e-3   | 98             |
| Rb-83   | 86.2 h    | 1.42e+0                            | no detect | 100            |
| Rb-84   | 32.8 d    | 2.11e-1                            | no detect | 100            |
| Y-88    | 106.7 d   | 2.78e+0                            | 1.36e-3   | 100            |
| Zr-88   | 83.4 d    | 3.94e-1                            | 8.65e-3   | 98             |
| Tc-95m  | 61.0 d    | 2.15e-1                            | no detect | 100            |
| Ag-105  | 41.3 d    | 4.34e-1                            | 1.42e-2   | 97             |

- K2K experiment 10Jan,2001 →12 Jul,2001 (Incident protons=2.82e+19)
- Dirty cooling water 270 liter
- Most radioactive isotopes are removable. Tritium can not be remove.

Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

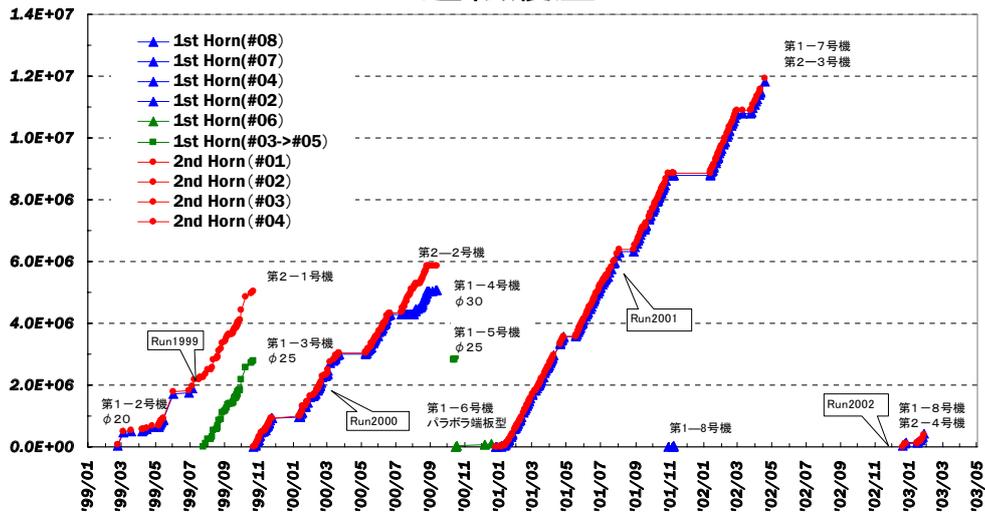
## pH control & Corrosion

- pH7.4~8.5
- Floating ion:  $[Al(H_2O)_2(OH)_4]^-$
- Conductance  $\doteq 10 \mu S/cm$
- Solution rate  $\doteq 0.4mg/cm^2 \cdot h$
- Self healing  
Corrosion  $\leftrightarrow$  Alumite growth  
( $\sim 5 \mu m$ )
- Neutralize of cooling water every 2 weeks
- pH6~7 is the best condition



Y. YAMANOI —KEK FEBRUARY 4, 2003

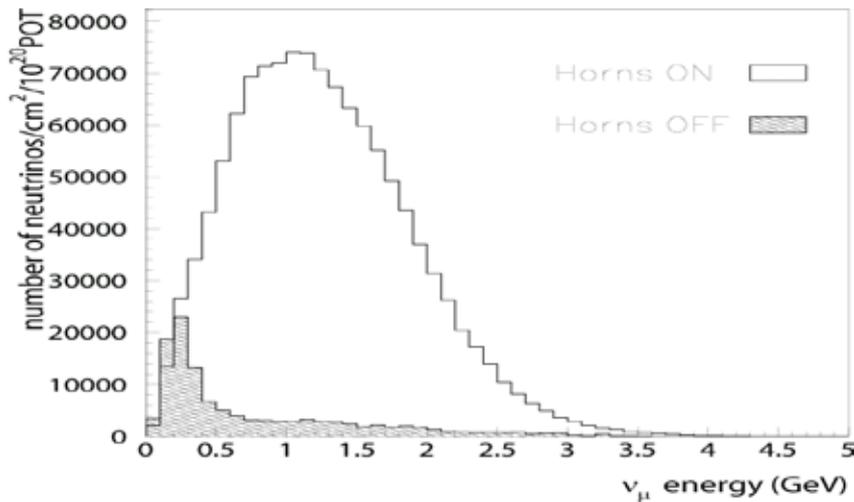
## 運転履歴



- ◆ 運転寿命; 1<sup>st</sup> HORN( $\phi 30$ ) =  $1.2E+7$
- ◆ 2<sup>nd</sup> HORN =  $1.2E+7$
- ◆  $\nu$  (@SK)/運転回数 = 1個/17万回 (=1個/4日)

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## Neutrino Flux at SK



The neutrino flux will be enhanced by 14 times by using this horn magnets system.

Y. YAMANOI - KEK FEBRUARY 4, 2003

## Resume (Jan.1999-Jul. 1999)

- Jan.30 First Beam (Slow) to Neutrino Beam Line
- Feb.3 First Beam (Fast) to Neutrino Beam Line
- Feb.22 [Horns were installed in Neutrino Beam Line](#)
- Mar.3 - **First Beam with Horn**
- Mar.12 - K2K Data Taking Started
- **Horn = 175kA**, 3Tprotons/spill on target
- Apr.13  $\nu$  Beam Control at **Horn = 250kA**
- Apr.14 -26 Trouble ( $5 \times 10^5$  Horn Cooling Water Pipe excitations)
- Horn =  $5 \times 10^5$  excitations
- May.9 -14  $\nu$  yield Study with **Horn =175kA - 250kA**
- May.14 - Horn Flexible Feeder Trouble ( $8.5 \times 10^5$  excitations)
- Jun.4 - 27 K2K Data Taking at **Horn =200kA**
- Jun.19 **First Neutrino Event in the Super-Kamiokande**
- Jul.8- 10 Horn Durability Test **Horn =250kA**
- Jul.10 1st Horn Target Rod Break ( $1.9 \times 10^6$  excitations)
- [New 1st Horn install \(#03\)](#)
- Jul.26-29 NBI 1999

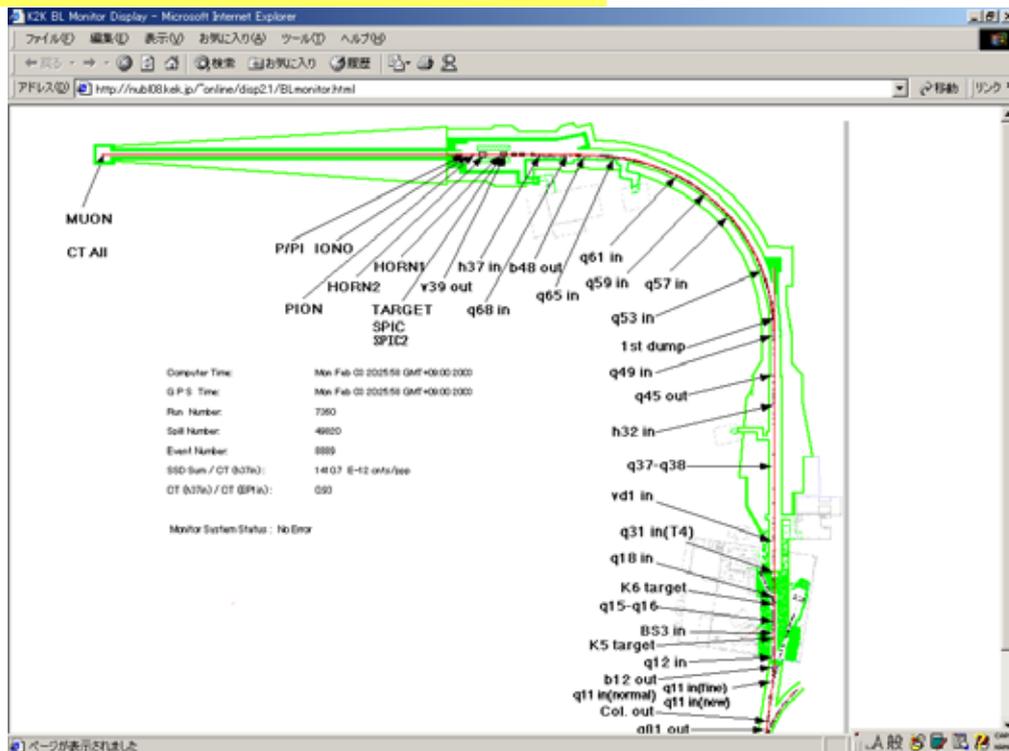
## Resume (Jul.1999- Aug.2000)

- Jul.26-29 NBI 1999
- Aug.22 Horn Durability Test
- 1st Horn (#03) =  $2.8 \times 10^6$  excitations @250kA
- 2nd Horn (#01) =  $5.1 \times 10^6$  excitations @250kA
- Oct.23 [New Horns install \(1-#04 & 2-#02\)](#)
- Oct.27 '00-Data Taking Start
- **Steady running**
- **2000 -----**
- Jun.21 Horn Strip Line Break ( $4.3 \times 10^6$  excitations)
- Run end ( $\nu$  28/38)
- Aug.28~ Horn Durability Test
- 1st Horn (#04) =  $5.0 \times 10^6$  excitations @250kA
- 2nd Horn (#01) =  $6.0 \times 10^6$  excitations @250kA
- Sep.01~ Tests with end cap structure
- Sep.6-9 NBI 2000
- Dec.21~ [Install new Horns](#)
- **2001-----**
- Jan.12~'01-Data Taking Start

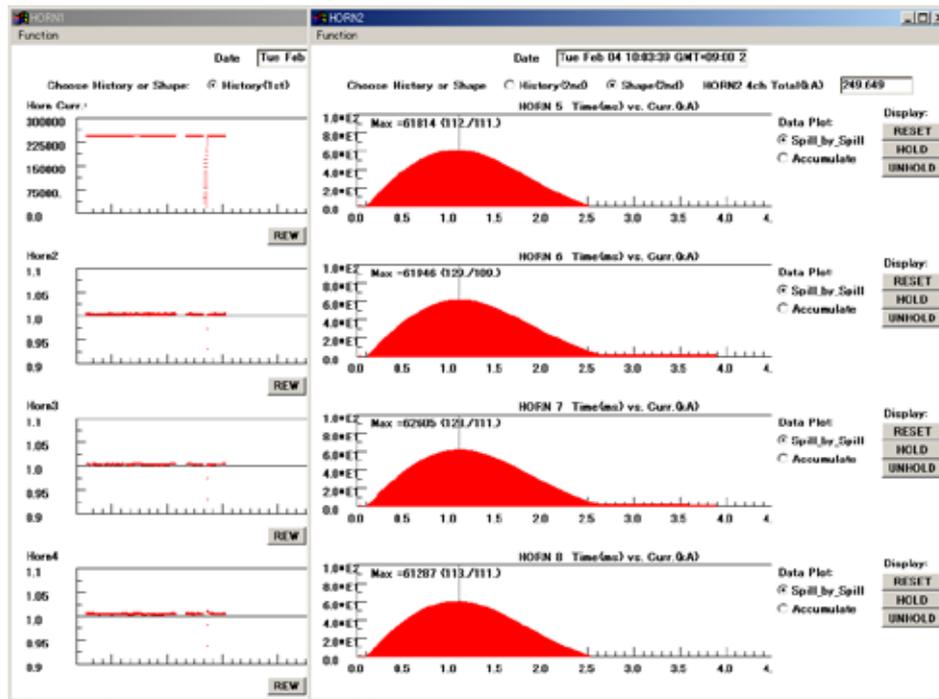
## Resume (Jan.2001- Feb.2003)

- Jan.12~ '01-Data Taking Start
- Apr. 2001 (  $\nu$  44/64)  
**Steady running**
- ~ Jul.12 Run end (  $\nu$  56/80.6)
- Jul.13 ~ Horn Durability Test
- **2002** -----
- Feb.10 1st Horn (#07) =  $10.0 \times 10^6$  excitations @250kA  
2nd Horn (#03) =  $10.0 \times 10^6$  excitations @250kA
- **Apr. 2002** **1st Horn (#07) =  $12.0 \times 10^6$  excitations @250kA**
- **2nd Horn (#03) =  $12.0 \times 10^6$  excitations @250kA**
- Dec. 2002 New Horns install (1-#08 & 2-#04)
- Dec. 2002 '02-Data Taking Start
- **2003** -----
- Jan.12~ '02-Data Taking Start  
**Steady running**

<http://nub108/~online/disp2.1/BLmonitor.html>



<http://nubl08/~online/disp2.1/BLmonitor.html>



## まとめ

1. 第一ホーン、第2ホーンともに1200万回の耐久性能を実証した。
2. 2002年度までに56個のニュートリノ事象をSKで観測することが出来た。
3. 今後、大強度加速器計画における電磁ホーンに今回の技術を継承していきたい。

## 関連する論文、技術報告書リスト

1. Y. Yamanoi et al., Large Horn Magnets at the KEK Neutrino Beam Line, Proc., on Magnet Technology (MT15), p711-p714 (1997), KEK Preprint 97-225
2. Y. Yamanoi et al., Large Horn Magnets at the KEK Neutrino Beam Line --- part2, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 10, No.1, p252- p 255 (2000), KEK Preprint 99-178
3. M. Ieiri et al., Magnetic Horn for a Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment at KEK, Proc., on 11th Accelerator Science and Technology, p377-p379 (1997)
4. Y. Suzuki et al., Control and timing of the 250kA Pulse Magnetic Horn, Proc., on Accelerator and Large Experimental Physics Control System, p266-p268, (1997)
5. 鈴木善尋、山野井豊、家入正治、加藤洋二、皆川道文、草野恵理奈、野海博之、田中万博、高崎稔、  
ニュートリノビームライン250kA ホーン用パルス電源、KEK Proceeding 99-20, 第5回加速器電源シンポジウム報告集、p78-p96, (1999)
6. Y. Suzuki, Y. Yamanoi, M. Ieiri, Y. Kato, M. Minakawa, H. Noumi, K.H. Tanaka, M. Takasaki, The Neutrino Beam Line Control System, ICALEPCS'99, Trieste, Italy
7. Y. Suzuki, Y. Yamanoi, M. Kohama, M. Ieiri, H. Ishii, Y. Kato, M. Minakawa, H. Noumi, K.H. Tanaka, M. Takasaki, and K. Nishikawa,  
Control and Timing of the 250kA Pulse Magnetic Horn, ICALEPCS'97, CHINA, Beijing
8. M. Ieiri et al., Neutrino Beam Line for a Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment at KEK, Proc., on the First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98), p579-p581
9. 宮本伸一、東京大学、理学系研究科物理学専攻、修士論文 (1996)
10. 小浜光洋、神戸大学、自然科学研究科物理学専攻、修士論文 (1997)
11. Y. Suzuki, M. Ieiri, Y. Kato, E. Kusano, M. Minakawa, H. Noumi, M. Takasaki, K.H. Tanaka and Y. Yamanoi,  
GPIB Address Converter, KEK Preprint 2001-148, ICALEPCS 2001, San-Jose, California, USA, November 27-30 (2001)
12. Y. Suzuki, M. Takasaki, M. Minakawa, H. Ishii, Y. Kato, M. Ieiri, K.H. Tanaka, H. Noumi, Y. Yamanoi,  
An Interface for the Neutrino Beam Line Control System, International workshop on control systems for small and medium scale Accelerator 1996, Tsukuba
13. K.H. Tanaka, Y. Yamanoi, E. Kusano, M. Minakawa, H. Noumi, M. Ieiri, Y. Katoh, Y. Suzuki, M. Takasaki, S. Tsukada, K. Yahata, Y. Saitoh and K. Katoh,  
Development of Radiation-Resistant Magnets for the JHF Project, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol10, No. 1, March 2000, KEK Preprint 99-86

- 1 4 . K.H. Tanaka, Y. Yamanoi, M. Ieiri, H. Noumi, M. Minakawa, H. Ishii, Y. Katoh, Y. Suzuki, M. Takasaki,  
DEVELOPMENT OF RADIATION RESISTANT MAGNETS COILS FOR HIGH  
INTENSITY BEAM LINES, KEK Internal 97-215
- 1 5 . T. Suzuki, M. Numajiri, S. Ban, Y. Kanda, Y. Oki, Y. Namito, T. Miura, H. Hirayama,  
K. Kondo, M. Takasaki, K.H. Tanaka, Y. Yamanoi, M. Minakawa, H. Noumi, M. Ieiri,  
Y. Kato, H. Ishii, Y. Suzuki, and N. Mokhov,  
SHIELDING DESIGN OF DECAY VOLUME AND TARGET STATION FOR NEUTRINO  
OSCILLATION EXPERIMENT USING MARS, KEK Preprint 97-16 SARE3 (1997)
- 1 6 . T. Suzuki, M. Numajiri, S. Ban, Y. Kanda, Y. Oki, Y. Namito, T. Miura, H. Hirayama,  
K. Kondo, M. Takasaki, K.H. Tanaka, Y. Yamanoi, M. Minakawa, H. Noumi, M. Ieiri,  
Y. Kato, H. Ishii, Y. Suzuki, T. Shibata, K. Nishikawa, and N. Mokhov,  
Comparison between Soil Benchmark Experiment and MARS Calculation, KEK preprint 97-15  
SARE3 (1997)
- 1 7 . S. Yamada, K. Nakamura, T. Sato, M. Takasaki, K.H. Tanaka, M. Ieiri, H. Noumi,  
Y. Suzuki, H. Ishii, Y. Katoh, Y. Yamanoi, M. Minakawa, K. Kondo, H. Hirayama, T. Suzuki,  
T. Miura, and S. Takahara,  
DESIGN FOR THE RADIATION PROTECTION OF THE RADIATION CONTROLLED  
AREA AROUND THE KEK-PS NORTH COUNTER HALL, KEK Internal 97-12
- 1 8 . S. Yamada, K. Nakamura, T. Sato, M. Takasaki, K.H. Tanaka, M. Ieiri, H. Noumi,  
Y. Suzuki, H. Ishii, Y. Katoh, Y. Yamanoi, M. Minakawa, K. Kondo, H. Hirayama, T. Suzuki,  
T. Miura, and S. Takahara,  
DESIGN FOR THE RADIATION PROTECTION OF THE MODIFIED EP2 BEAM LINE IN  
THE KEK-PS EAST COUNTER HALL, KEK Internal 97-11

## 編集後記

KEK技術賞は、高エネルギー加速器研究機構における技術上の優れた業績を表彰し、もって広く技術の発展に資することを目的として平成12年度に創設された。

推薦された技術賞候補案件は、各研究所、研究施設、技術部及び管理局から選出された委員による「KEK技術賞専門部会」において審査される。審査は各推薦者によるそれぞれの技術内容紹介と技術開発現場における候補者本人による内容説明を必ず行なった上、部会において審議、最終判断を行なう。その際、より十分な検討を行なうため、追加資料を本人から提出してもらうこともある。こうした審査を経て、技術賞が決定され機構長に推薦される。

審査基準は、これまで積み上げられてきた審査に対する基本的な考え方をふまえ、以下の4項目を基本としている。

- (1) 技術への取り組みが創造的である
- (2) 技術の具体化への貢献、成果が顕著である
- (3) KEKの推進する研究計画への技術貢献が顕著である
- (4) 技術伝承への努力が積み重ねられている

KEK技術賞の募集は毎年11月までを公募期間とし、年度内に受賞者を決定・発表する。受賞論文は、KEKインターナル・レポート（本冊子）として出版され、広く関係者等にも配布されている。多くの皆さんが自分の磨き上げた技術をもって、KEK技術賞へチャレンジしていただくようお願いしたい。

平成21年10月  
出版担当 人事労務課

