

# 修士学位論文

## 気球搭載用超電導スペクトロメータの ための Trigger system の研究開発

平成9年2月10日

研究科名 神戸大学自然科学研究科

専攻名 物理学専攻

学籍番号 954S106N

氏名 佐々木 誠

## 目次

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>                            | <b>2</b>  |
| 1.1      | 宇宙線伝播と反物質                            | 2         |
| 1.2      | 宇宙線中の反陽子                             | 2         |
| <b>2</b> | <b>BESS 実験</b>                       | <b>4</b>  |
| 2.1      | 実験の目的                                | 4         |
| 2.2      | 測定器の構成                               | 4         |
| 2.3      | 実験の現状と将来計画                           | 5         |
| <b>3</b> | <b>BESS の trigger system</b>         | <b>7</b>  |
| 3.1      | Trigger の詳細                          | 7         |
| 3.1.1    | T0 trigger                           | 7         |
| 3.1.2    | Track trigger                        | 8         |
| 3.1.3    | T1 trigger                           | 9         |
| 3.2      | '97以降の trigger system                | 10        |
| <b>4</b> | <b>T0 trigger の変更</b>                | <b>12</b> |
| 4.1      | Matrix coincidence                   | 12        |
| 4.1.1    | 不感時間と trigger                        | 12        |
| 4.1.2    | Matrix coincidence module            | 12        |
| 4.1.3    | Event selection                      | 13        |
| 4.1.4    | Annihilation event                   | 17        |
| 4.2      | 高速 T0 trigger                        | 18        |
| 4.2.1    | T0 trigger と chamber の不感領域           | 18        |
| 4.2.2    | T0 trigger の delay                   | 19        |
| 4.2.3    | 高速 T0 trigger module                 | 19        |
| 4.2.4    | 高速化のメリット                             | 20        |
| 4.2.5    | High charge trigger                  | 20        |
| <b>5</b> | <b>Track trigger の変更</b>             | <b>21</b> |
| 5.1      | TOF-IDC track trigger                | 21        |
| 5.1.1    | 測定エネルギー領域と測定器                        | 21        |
| 5.1.2    | TOF 信号の Latch                        | 21        |
| 5.1.3    | ODC-IDC track trigger との比較           | 22        |
| 5.2      | 高速 T0 trigger との組み合わせ                | 22        |
| <b>6</b> | <b>今後の展望</b>                         | <b>24</b> |
| <b>7</b> | <b>謝辞</b>                            | <b>24</b> |
| <b>A</b> | <b>Matrix coincidence module 回路図</b> | <b>26</b> |
| <b>B</b> | <b>OR-Latch module 回路図</b>           | <b>31</b> |

# 1 序論

## 1.1 宇宙線伝播と反物質

現在地球に降ってくる宇宙線のほとんどは物質であり、一次粒子としての宇宙線反物質はまだ観測されていない。これは我々の宇宙が物質優勢であることを示しており、物質と反物質の対称性は破れているように見える。標準理論では宇宙誕生直後に『物質/反物質の自発的対称性の破れ』がおき、宇宙初期の段階で反物質が消滅してしまったためとして説明しているが、宇宙に反物質で構成された反銀河のような存在があることを完全に否定しているわけではない。 $\gamma$ 線の観測(宇宙に反物質が存在したとすれば、物質との対消滅により $\gamma$ 線が放出される)により10Mpc以内のscaleでのこのような反銀河の存在は否定されているが、Steckerらの計算によれば[1]数100Mpc程度の宇宙scaleのなかに反物質クラスターが存在したとすれば宇宙線観測を通じて $10^{-6}$ のオーダーで、宇宙線中に反粒子が観測されるとの算定も示されている。中でも反ヘリウムは宇宙線の衝突により二次的に生成される確立が極めて小さく、もし観測することができれば反銀河の存在を示す直接的な証拠となる。

## 1.2 宇宙線中の反陽子

反陽子は宇宙線中の陽子と星間物質との衝突により二次的に生成されるため反銀河探索の目的には不向きである。しかし、宇宙線中の反陽子の起源として暗黒物質の候補であるNeutralinoの対消滅反応による生成[2, 3]やPrimordial Black Holes (PBH)の蒸発による生成[4, 5]などの一次生成プロセスが存在する可能性があげられており、その流束の精密な測定には物理的に大きな意義がある。陽子と星間物質との衝突による二次生成の過程は



のように表されその生成確率は地上で加速器を用いた実験により求められており([6])、その値をもとに、地球に降ってくる二次生成された反陽子の流束が予測されている([7, 8, 9, 10])。運動学的な要請によりエネルギー2GeV以下では急速にその生成が抑制されるため、もし宇宙線中に一次生成プロセスによる反陽子が存在するならば、エネルギー2GeV以下でその兆候を観測することができる。BESS実験(後述)ではこ

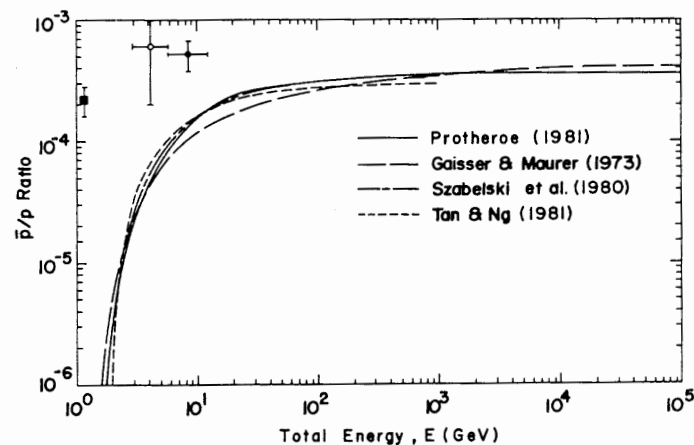


図 1: 二次生成 $\bar{p}$ の流束の予測値 [7]

の宇宙線中の低エネルギー反陽子の流束を観測しており、過去3年間の飛翔実験において約50個程度の反陽子を観測した。今後は測定データの精度をさらに高め、また様々な測定器の改良を行ない質の高いデー

タを測定することにより宇宙線中の反陽子の起源に迫っていく。本論文では、その目的のためにおこなってきた BESS 測定器の改良に伴う trigger system の変更及び改良についての研究をまとめる。まず現在の trigger system について説明し、その後私の行なった個々の trigger についての研究を述べる。

## 2 BESS 実験

我々は気球を用い測定器を地上から約 36km 上空 (Residual air < 5g/cm<sup>2</sup>) まで打ち上げ、大気の影響を極力排除して宇宙線反物質その他の観測を行なっている。測定器には高エネルギー加速器実験の分野で培われた最先端の粒子検出器技術を用いており、気球による宇宙線観測実験としては圧倒的な高感度で反物質の観測を行なうことができる。Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer (BESS) は '93、'94、'95 年の過去 3 年間磁極に近いカナダにおいて気球による飛翔実験を行ない、粒子の質量同定という確実な方法を用いて世界で始めて低エネルギー領域の宇宙線反陽子の観測に成功している。[14]

### 2.1 実験の目的

現在宇宙線空間に存在する反陽子 ( $\bar{p}$ ) は宇宙線中の陽子と星間物質との衝突により二次的に生成されたものであると考えられている。しかし、実験で観測された反陽子の流束はいずれも標準的な二次生成のモデルによる予測値より高い値を示しており、一次生成された反陽子の存在を暗示させる。我々は粒子の質量同定という確実な方法でこの観測を行ない、宇宙線中の反陽子の起源の問題に決着をつけることを実験の主眼としている。その他にも一例でも観測されれば反銀河の存在の直接の証拠となる反ヘリウムの観測、大気ニュートリノ異常問題に対してニュートリノ流束の精密な予測を可能にするための一次宇宙線流束の精密測定及び地上での  $\mu$  粒子の測定を行なっている。

### 2.2 測定器の構成

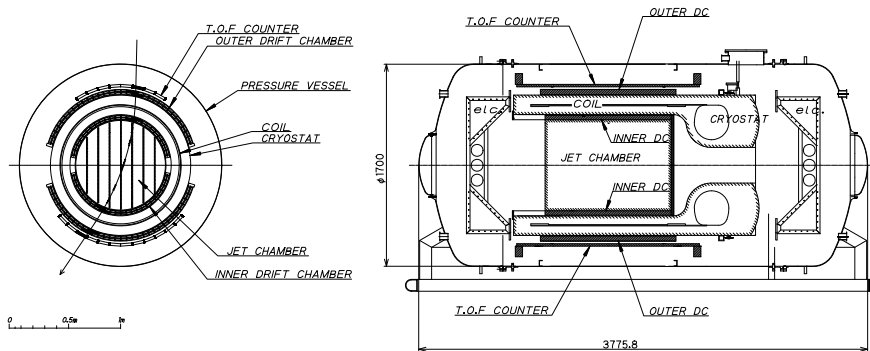


図 2: BESS 測定器 ('96)

BESS 測定器 (図 2) は質量同定型の粒子検出器である。測定器を通過した粒子は、MAG の発生した 1-1.2 T のソレノイド型の磁場を受け、その飛跡を曲げる。JET によりその飛跡を検出し、rigidity (運動量/電荷) を求め、TOF による飛行時間の測定と合わせて粒子の質量を決定し、粒子を同定する。以下に BESS 測定器の各々の検出器の特徴及びその性能をあげる。

**JET** JET-type drift chamber。測定器の中心に設置され入射荷電粒子の飛跡を測定する。直径 766mm 長さ 1060mm の円筒形で  $\Delta p/p \sim 0.3p(\text{GeV})\%$  の運動量分解能を有する。

**IDC** Inner Drift Chamber。内半径 384mm、外半径 420mm 中心角、156° の円弧形をしたセル方式の drift chamber である。JET の上下に一台ずつ計二台設置される。一台の IDC は二層からなり、周方向に 50mm のセルがフェーズをずらして配列されている。 $R\phi$  方向の 200 $\mu\text{m}$  の位置分解能に加え、1 周期 100mm のダイヤモンド型のバーニアパッドを用いて z 軸方向の位置を 300 $\mu\text{m}$  の精度で測定することができる。

**MAG** Superconducting solenoidal **MAG**net。直径 0.8m 長さ 1m の空間に 1-1.2T のソレノイド型の磁場を 15% の均一度で発生する。粒子透過性が非常に良く (約 0.2 輻射長)、ヘリウムの補給なしで約 5 日間磁場を発生し続けることができる。

**ODC** **O**uter **D**rift **C**hamber。MAG の上下に一台ずつ計二台設置される。内半径 594mm、外半径 654mm、中心角 143° の円弧形をした cell 方式の drift chamber である。IDC とともに反粒子を選択的に記録するためのオンライントリガー (track trigger) に用いられる。

**TOF** **T**ime **O**f **F**light counter hodoscope。粒子の飛行時間を測定する装置。検出器の最外部にあり、上側に 8 本下側に 12 本設置された厚さ 2cm 幅 10cm のプラスチック・シンチレーション・カウンター (TOF counter) で構成される。1994 年度までは時間分解能 ~300psec だったが、1995 年度の改良により時間分解能 ~110psec に改善されている [15]。エネルギー損失 (dE/dx) 分解能 15% を有し飛行時間測定と組み合わせて入射粒子の識別を行なう。またその信号は bess の 1st Level trigger である T0 trigger にも使用される。

**PV** **P**ressure **V**essel。測定器を収容する圧力容器で、高空において温度・気圧の低下による測定器周辺の環境の悪化を防ぐ。

### 2.3 実験の現状と将来計画

BESS 実験により今まで得られた物理的成果は主に以下の通りである。

- エネルギー領域 0.9-1.4GeV で 46 個の反陽子を観測 (図 3)。
- 宇宙線中の反ヘリウムを探索する。
- 陽子の流束を ±10% の精度で測定 (図 4)。
- 地上における  $\mu$  粒子のエネルギースペクトルを測定 (解析中)

今後は統計量を増やし測定値の精度をあげるとともに測定エネルギー領域を広げ、宇宙線中の反陽子の起源や宇宙線の伝播モデルに制限を与えるため引き続き観測を行なっていく。そのため、現在我々は

- 新しい粒子識別器である Aerogel Čerenkov counter の搭載。
- TOF counter(後述) の時間分解能改善及びその飛行距離拡張
- 測定器の軽量化による飛翔時間の増大。
- New JET、IDC(後述) の製作。
- Transputer(CPU の一種) bank を用いた event の software selection。

等の測定器の改良を進めている。また、10 日間にも及ぶ長時間 Flight も予定されており、低エネルギー反陽子、反ヘリウムに関してさらに一桁以上感度をあげた探索を行なうことができ、宇宙起源の反粒子にまつわる物理上重要な諸問題に決着をつけることが可能となる。その他にも新しい粒子識別装置を組み込むことにより、電子・陽電子の流束比の問題などの興味ある物理についての研究を行なうことも計画されている ([11, 12, 13])。

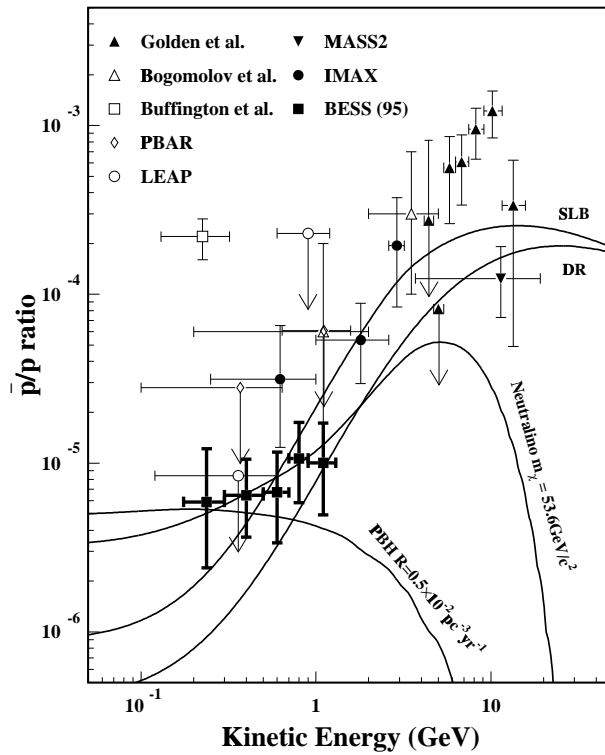


図 3: 観測された $\bar{p}/p$  ratio。図中に示された線は 2 次生成された $\bar{p}$ に対する流束の予測値と一次起源の $\bar{p}$ に対する予測値。

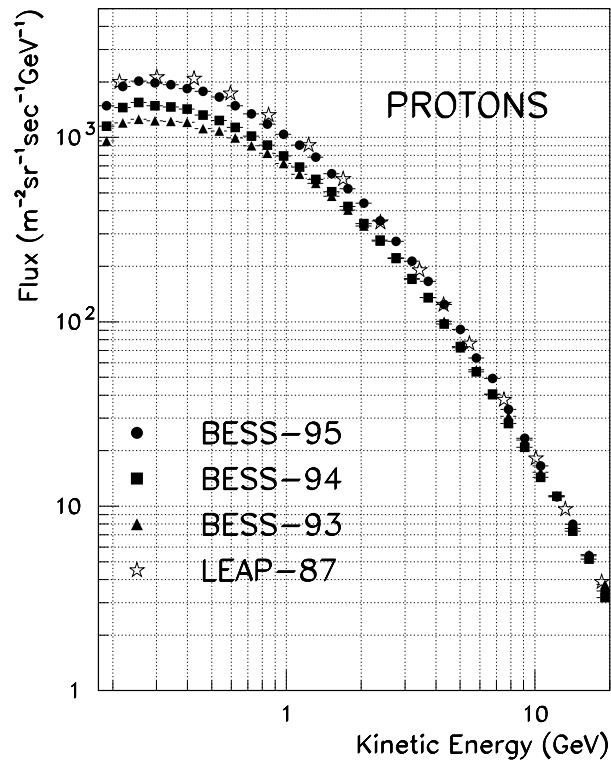


図 4: 陽子の流束

### 3 BESS の trigger system

BESS 測定器中を粒子が通過すると測定器の上下におかれた TOF counter が信号を出力し、そのコインシデンスをとることにより、1st Level trigger (T0 trigger) が出力される。BESS の read-out electronics (ADC、TDC、FADC など) はこの T0 trigger 信号によって起動される。しかし上空での T0 trigger のレートはおよそ 2.3kHz と高いため、そのままでは約 20 時間行なわれる飛翔中のすべての event を検出器に搭載したテープに記録することは出来ない (1 event は 1~2kbyte、テープの容量は 10Gbyte)。またそのほとんどの event は陽子であるため、我々の興味の対象である反陽子等に対する efficiency は悪くなってしまう。そこで4台の drift chamber (IDC、ODC) のヒットパターンから粒子の電荷を判別し、電荷が負の粒子に選択的に trigger をかけ膨大な低エネルギー陽子 event の rejection を行なう。それが 2nd Level trigger (track trigger) であり、それに track trigger の efficiency check 用の sample event (T0 trigger を sampling したものを) を加えて T1 trigger (最終的な event の accept 信号、およそ 100Hz) として出力する (図 5)。

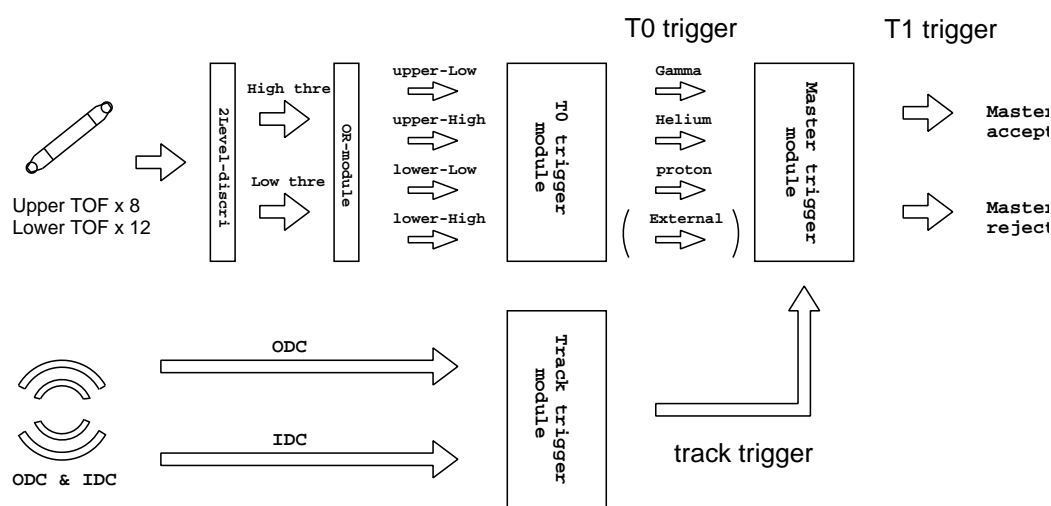


図 5: BESS の trigger system

以下ではそれぞれの trigger について詳しく説明する。

#### 3.1 Trigger の詳細

##### 3.1.1 T0 trigger

荷電粒子が BESS 測定器中を通過すると TOF counter の scintillator<sup>1</sup>部で scintillation<sup>2</sup>を起こす。scintillation 光は Light guide<sup>3</sup>により TOF counter の左右に取り付けられた Photo Multiplier Tube<sup>4</sup>(PMT) に集められ、電流信号に変換され出力される。左右の PMT からの信号は Analog sum<sup>5</sup> により passive に summation された後、2Level discriminator に入力され Imin<sup>6</sup> より十分低い Level に設定した Low threshold Level と、Imin の約 2.8 倍の Level に設定した High threshold Level により discriminate される。上下 20 本の TOF counter の Low threshold、High threshold 信号は OR module でそれぞれ上 TOF、下 TOF

<sup>1</sup> 能率の良い蛍光体で、蛍光の減衰時間が比較的短くて、放射線計測で scintillation counter として適当なものをいう

<sup>2</sup> 荷電粒子が物質中を通過すると原子または分子を励起する。この励起状態から基底状態に落ちるとき光を放出することをいう

<sup>3</sup> アクリル板。光子を誘導するためのもの。

<sup>4</sup> 微小な光を電流に変換する装置。

<sup>5</sup> 抵抗とコンデンサからなり、impedance matching をとって信号の sum を行なうための回路。

<sup>6</sup> 最小電荷の粒子が通過した時に出力される信号の平均値



毎に論理 OR をとられ、Upper-Low、Upper-High、Lower-Low、Lower-High の 4 つの信号にまとめられた後、T0 trigger module に入力される。ここで Upper-Low 信号以外は trigger の timing を合わせるため、5m のケーブルを用い 25nsec 程度遅らせておく。また、Upper-Low 信号は T0 trigger module 内で oneshot<sup>7</sup>により pulse 幅を 100nsec に広げらる。T0 trigger module では上記 4 つの信号から以下にあげる 3 つの trigger を生成する。

- **Proton-trigger** Upper-Low 信号 と Lower-Low 信号のコインシデンス信号。
- **Helium-trigger** Upper-High 信号 と Lower-High 信号のコインシデンス信号。
- **$\gamma$ -trigger** Upper-Low 信号 が出力されず Lower-Low 信号のみが出力される信号。

また、BESS 測定器では テスト用 trigger として TOF counter からの信号とは無関係に周期的に T0 trigger を出力するため、T0 trigger module に pulse generator からの信号を入力し External-trigger 信号を生成している。External-trigger 信号は pulse generator の周期を変更することにより、自由にレートを変更できる。T0 trigger 信号は Proton-trigger、Helium-trigger、 $\gamma$ -trigger と、External-trigger の論理 OR として出力される (図 6)。表 1 は '95 Flight 時の T0 trigger のそれぞれの rate である。

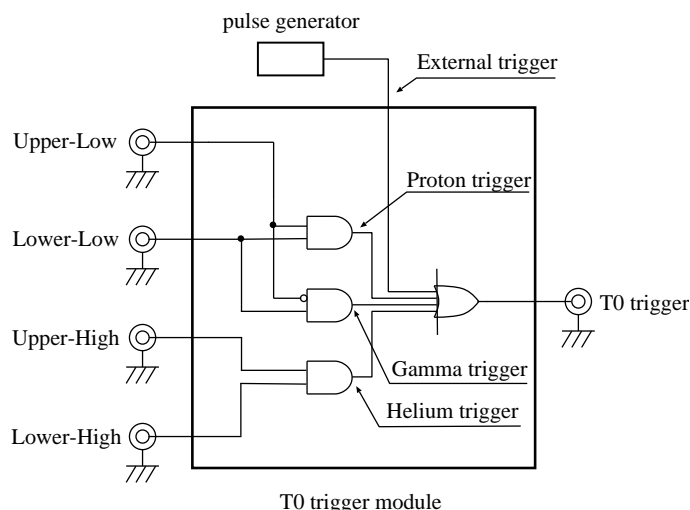


図 6: T0 trigger の構成

### 3.1.2 Track trigger

IDC / ODC からの信号は Amp&Discri で discriminate され、Coincidence module に入力される。ここで IDC / ODC の wire ごとの信号から、その内層と外層との coincidence をとることによって cell ごとの信号が生成され、track trigger module に入力される。track trigger module ではこの cell hit 信号により、2段階にわたった event selection をおこなっていく。

- Hit pattern selection

track trigger module に入力された cell hit 信号は chamber 毎に hit 数を数えられ、各 chamber の hit cell 数が 4 以下の場合は、以下の 8 種類の信号に分けられる。

–  $\bar{p}$  clear すべての chamber に 1 つずつ hit(1111)

<sup>7</sup>信号が入力されると、一つ pulse を出力するシリーズ IC

表 1: Summary of the T0 trigger.

| BESS-95 flight |     |      |        |      |     |               |                     |           |
|----------------|-----|------|--------|------|-----|---------------|---------------------|-----------|
| Mode           | Top |      | Bottom |      | Ext | Count<br>Down | Coincidence<br>Rate | T0<br>Out |
|                | Low | High | Low    | High |     |               |                     |           |
| T0 Low         | 1   | *    | 1      | *    | *   | 1/1           | 2.0 kHz             | 2.0 kHz   |
| T0 High        | *   | 1    | *      | 1    | *   | 1/1           | 260 Hz              | 260 Hz    |
| T0 gamma       | 0   | 0    | 1      | *    | *   | 1/256         | 18 kHz              | 70 Hz     |
| T0 extern      | *   | *    | *      | *    | 1   | 0             | 0                   | 0         |

- 1 : Signal should be asserted.
- 0 : Signal should be negated.
- \* : Signal is not concerned.

- $\bar{p}$  dirty 一つの chamber だけ 2 hits 後は 1つ (1112p)
- $\bar{H}e$  clear すべての chamber に 1つずつ hit(1111)
- $\bar{H}e$  dirty 一つの chamber だけ 2 hits 後は 1つ (1112p)
- Missing 一つの chamber は no hit 後は 1つずつ hit(0111p)
- Multi clear IDC2 と ODC2 は multi-hit、後は 1つずつ hit(1113、1124、1132、etc.)
- Multi dirty ODC1 に 2つの hit 残りは multi-hit (2134、2332、etc.)
- Gamma ODC1 に hit なし、残りの chamber には 1つか2つの hit(0111、0212、etc.)

- Rigidity selection

hit-pattern selection により 8種類にわけられた event はその cell hit pattern に対して、可能なすべての rigidity を求められ、その値を digital 化される。digital 化された rigidity は、trigger efficiency を考慮して設定された threshold と比較され、その値を越えた event は track trigger を出力する。

### 3.1.3 T1 trigger

T1 trigger は Master trigger module によって生成される。Master trigger module には T0 trigger の 4つの trigger pattern と track trigger の 8つの trigger pattern が入力され、その pattern をもとに accept 信号もしくは reject 信号 を出力する。accept 信号は Master trigger 内で作られる 12種の trigger 信号の OR 信号であり、そのうち 4種は T0 trigger を count down したものの、8種は T0 trigger からの charge の情報と track trigger からの track の情報にもとづいて発生する trigger を count down したものである。accept 信号が出力されると BESS のデータ収集が開始され、evnt builder により一つの event に package されてテープに記録される。reject 信号が出力されると、fast clear module から fast clear 信号が出力され、CAMAC module のデータクリアーが行なわれる。以下に '95 の Flight の T1 trigger rate の table を載せる。

表 2: Summary of T1 trigger ('95).

| T1 Mode          | T0 Trig | CD    | $Trigate^B$ | $Trigate^A$ |
|------------------|---------|-------|-------------|-------------|
| $\bar{p}$ clear  | 0 1 0   | 1/1   | 34 Hz       | 34 Hz       |
| $\bar{p}$ dirty  | 1 1 1   | 1/1   | 27 Hz       | 27 Hz       |
| $\bar{H}e$ clear | 0 1 0   | 1/1   | 11 Hz       | 11 Hz       |
| $\bar{H}e$ dirty | 0 0 0   | 1/1   | 10 Hz       | 10 Hz       |
| Missing          | 1 0 1   | 1/100 | 8 Hz        | 0.1 Hz      |
| Multi clear      | 0 0 1   | 1/3   | 16 Hz       | 16 Hz       |
| Multi dirty      | 0 0 0   | 1/1   | -           | -           |
| Gamma            | 0 0 1   | 1/10  | 1 Hz        | 0.1 Hz      |
| T0 Low CD        | 1 0 0   | 1/90  | 1.2 kHz     | 13 Hz       |
| T0 High CD       | 0 1 0   | 1/20  | 260 Hz      | 8 Hz        |
| T0 Gam CD        | 0 0 1   | 1/256 | 43 Hz       | 0.2 Hz      |
| T0 Ext CD        | - - -   | -     | -           | -           |

$Trigate^B$  : Before count down

$Trigate^A$  : After count down

### 3.2 '97以降の trigger system

我々は'97以降の飛翔実験に備えて様々な測定器の改良/開発を行ってきた (See Section 2.3)。それに伴い trigger system の変更もまた必要であり、上記 trigger system をそのまま使用することはできない。しかし逆にいえば、今までの trigger system の無駄を省き、より機能的な trigger system に改良する chance でもある。以下の section では様々な trigger system について議論していくが、ここで '96 までの問題点と、測定器の変更に伴う変更点についてまとめておく。

- 不感時間

'95 の飛翔実験では不感時間が 40 % もあり、限られた飛翔時間を十分活用できていない。測定データの精度を向上させるためには統計をためる必要があり、不感時間の削減が求められている。

- 測定エネルギー領域

BESS の '93、'94、'95 のデータからは一次起源の反陽子の存在を否定することも肯定することもできない。反陽子の起源が二次生成されたものだけなのか、それとも一次生成されたものが存在するのかを明確に判断するためには、フラックスの変化の急なところだけではなく安定している領域から測定する必要があるが、現在の BESS の測定エネルギー領域の上限では、そこまで測定することが出来ていない。'97 以降、測定器を改良することにより測定可能なエネルギー領域の上限を現在の 1.4 GeV から約 4 GeV まで向上させる。それに伴い 2nd trigger で使用している ODC を外さなければならない。

- Drift chamber の不感領域

現在 drift chamber のデータを解析するとワイヤー近傍のデータが得られていないことがわかる。これはワイヤーからの信号が T0 trigger の出力より速く出力されてしまっているためである。chamber データの calibration 精度を向上させるためには、ワイヤー近傍のデータを得る必要がある。

- High charge 用 trigger

現在 T0 trigger には 入射粒子の電荷の大きさによる 区別として Proton-trigger (電荷 1) と Helium-trigger (電荷 2 以上) とがあり、track trigger による bias なしにそれぞれ sampling して記録されている。我々は電荷が 3 以上の High charge 粒子についても興味をもっているが、頻度が非常に低いいため 電荷 2 の粒子とともに sampling された Helium-trigger では 十分に統計をためることができない。そこで High charge 粒子については Helium-trigger とはわけて trigger 信号を出し sampling せずに記録出来るようにする。trigger scheme の変更を極力おさえるために High charge 用 trigger は現在の  $\gamma$ -trigger の代わりとして trigger system に組み込む。

## 4 T0 trigger の変更

### 4.1 Matrix coincidence

#### 4.1.1 不感時間 と trigger

気球実験におけるデータ収集システムの課題として、限られた Flight 時間で統計をためるため、いかに不感時間を少なくおさえるか、ということがある。’95年までの BESS のデータ収集システムでは fast clear (T1 trigger の段階で reject された Event の clear、2200Hz) にかかる時間 (約  $85\mu\text{sec}$ ) と実際の data acquisition にかかる時間 (約 1.2msec、100Hz) により、約 30 % の時間が不感時間となると計算されている。

$$\begin{aligned}\text{不感時間} &= 2200 \times 85 \times 10^{-6} + 100 \times 1.2 \times 10^{-3} \\ &= 0.309\end{aligned}$$

この不感時間を削減するためには、fast clear、data acquisition にかかる時間を減らす ([16]) という手段と、おおもとの T0 trigger の rate を下げるという手段があり、ここでは後者の手段について述べる。現在、BESS 測定器の 1st trigger である T0 trigger は上 TOF 8 本の論理 OR 信号と下 TOF 12 本の論理 OR 信号の coincidence によりかけられている (See section 3)。しかし、測定器の端をかすめるような event は JET による飛跡検出を行なうことができず、実際の解析には用いることができない。また、TOF counter が同時に複数本信号を出力するような場合には粒子の tracking を行なうことが出来ない。(図 7)。そこで T0

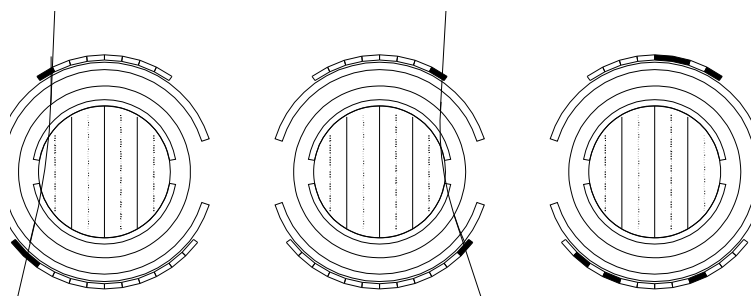


図 7: Examples of the hit patterns which we will omit.

trigger の中から上記のような event を取り除くことにより、T0 trigger の rate をおさえ、不感時間を削減する。そのため、T0 trigger を生成している module を event selection の機能を持つ Matrix coincidence module に置き換える。以下では Matrix coincidence module とそれを用いた event selection について述べる。

#### 4.1.2 Matrix coincidence module

Matrix coincidence module (See appendix A) とは OR module と T0 trigger module の両方の機能を合わせ持ち、TOF の hit pattern selection を行なうために開発された module である。1 Mbit $\times$ 1 の RAM<sup>8</sup>(1 Mbit は 2 進数で 20 桁であり、ちょうど BESS の TOF の本数に対応する。)を用いた look-up table 方式を採用しており、高速で TOF の hit pattern から T0 trigger を出力することができる。図 8 は matrix coincidence の概念を表したものである。上下の TOF の hit pattern をそれぞれ行と列にみたと、accept する hit pattern で決定される要素に “1” それ以外に “0” を与えた matrix を構成し、実際に粒子が BESS 測定器中を通過した時の TOF の hit pattern でその値を読み出す。値が “1” のときに信号を出力

<sup>8</sup>Random Access Memory

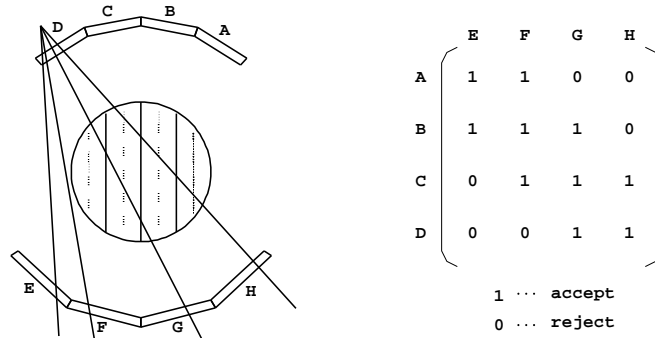


図 8: Schematic figure of Matrix Coincidence

する論理回路を組み T0 trigger 生成回路とする。Matrix の値は ROM<sup>9</sup>に書き込んでおき、module に電源を入れた後、データ access 時間の速い RAM にそのデータを書き移す (RAM は電源を切るとデータが消えてしまうので、matrix の記憶媒体としては使用できない。ROM は電源を切ってもデータは保持しておくが、memory access 時間が遅い)。RAM の memory access 時間は 20nsec であり、module に信号が入力されてから 50nsec 程度で hit pattern selection をかけた T0 trigger 信号を出力することができる。

#### 4.1.3 Event selection

ここでは '95 の Flight データをもとに、T0 trigger の selection を行ない、T0 trigger の rate をどこまで下げることが出来るかを考察する。以下では TOF counter の hit した本数による selection (hit-number rejection)、hit pattern による selection (hit-pattern rejection) を行なう。

**hit-number rejection** 図 9、10 は event 毎の TOF counter の hit 数を pie chart にしたものであり、反時計周りに hit 数 1、2、3...となっている。hit 数 1 の event は上 TOF で 85.5%、下 TOF で 77.6% を占めており、ここではその event はすべて accept する。TOF counter が複数本 hit した場合、実際に複数の粒子が BESS 測定器中を通過した可能性と、accidental に TOF counter が信号を出力した可能性 (例えば、エレキのノイズ、PMT の放電等) があるが、どちらにせよ trigger をかけた粒子の通過した counter あいまいになってしまうため、そういった event は reject してしまう。しかし counter が 2 本 hit した場合については考慮が必要で、粒子が隣あった二本の counter の間を通過した場合はたとえ通過粒子が一個でも counter が 2 本 hit 信号を出してしまう。そこで hit 数 2 の event から、隣あった二本の counter が hit した double hit、それ以外の separate hit にわけ double hit のほうは accept する。hit 数 2 の event について、図 11、12 にその結果を示す。下 TOF の場合は annihilation の効果があるため counter の hit 数では単純に accept/reject するわけにはいかないが、ここでは簡単化のため、上 TOF 同様に accept/reject してしまう。annihilation を考慮した場合については以下で別に論じる。図 13 に上記 rejection の結果を表示する。上記 rejection を施すことにより T0 trigger の 19.4% が reject できる。

**hit-pattern rejection** BESS 測定器の端をかすめるような event は JET chamber の fiducial region を通過しないため、rigidity を正確に測定できない。そのためそういった event についても rejection を行なう。図 14 は JET chamber の fiducial region と直線では (つまり高エネルギーでは) そこを通過しない event に対する TOF の hit pattern である (たとえ直線では fiducial region を通過しない TOF の hit pattern でもエネルギーが低い粒子ならば磁場によって曲げられ fiducial region を通過するた

<sup>9</sup>Read Only access Memory.

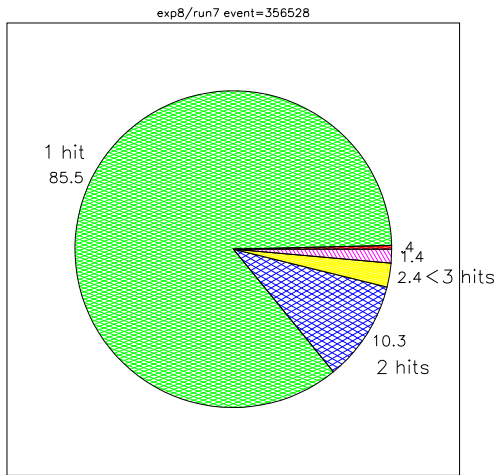


図 9: 上 TOF hit 数

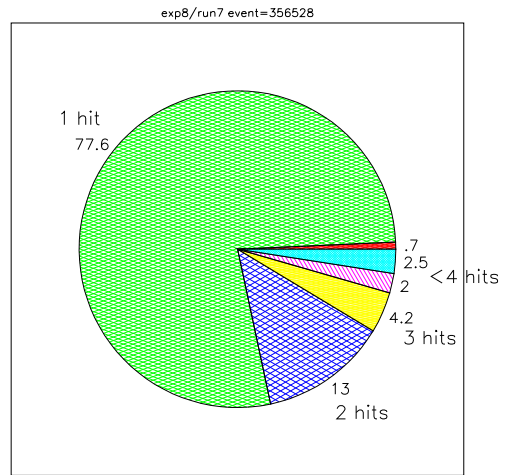


図 10: 下 TOF hit 数

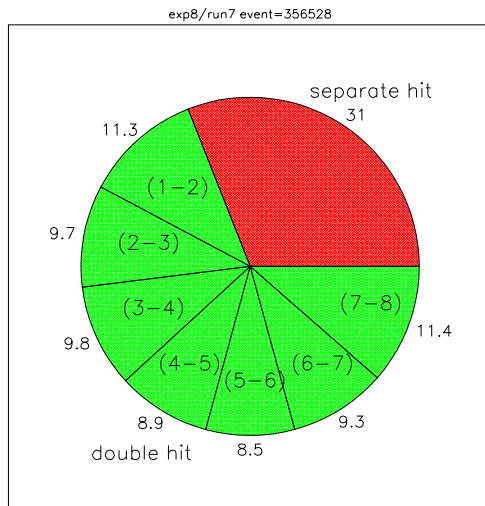


図 11: 2 hits event (上 TOF)

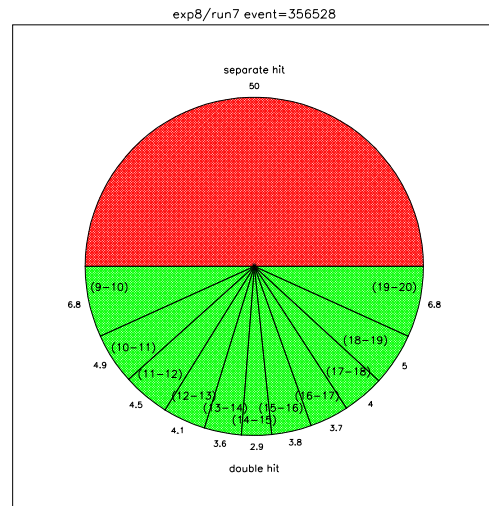
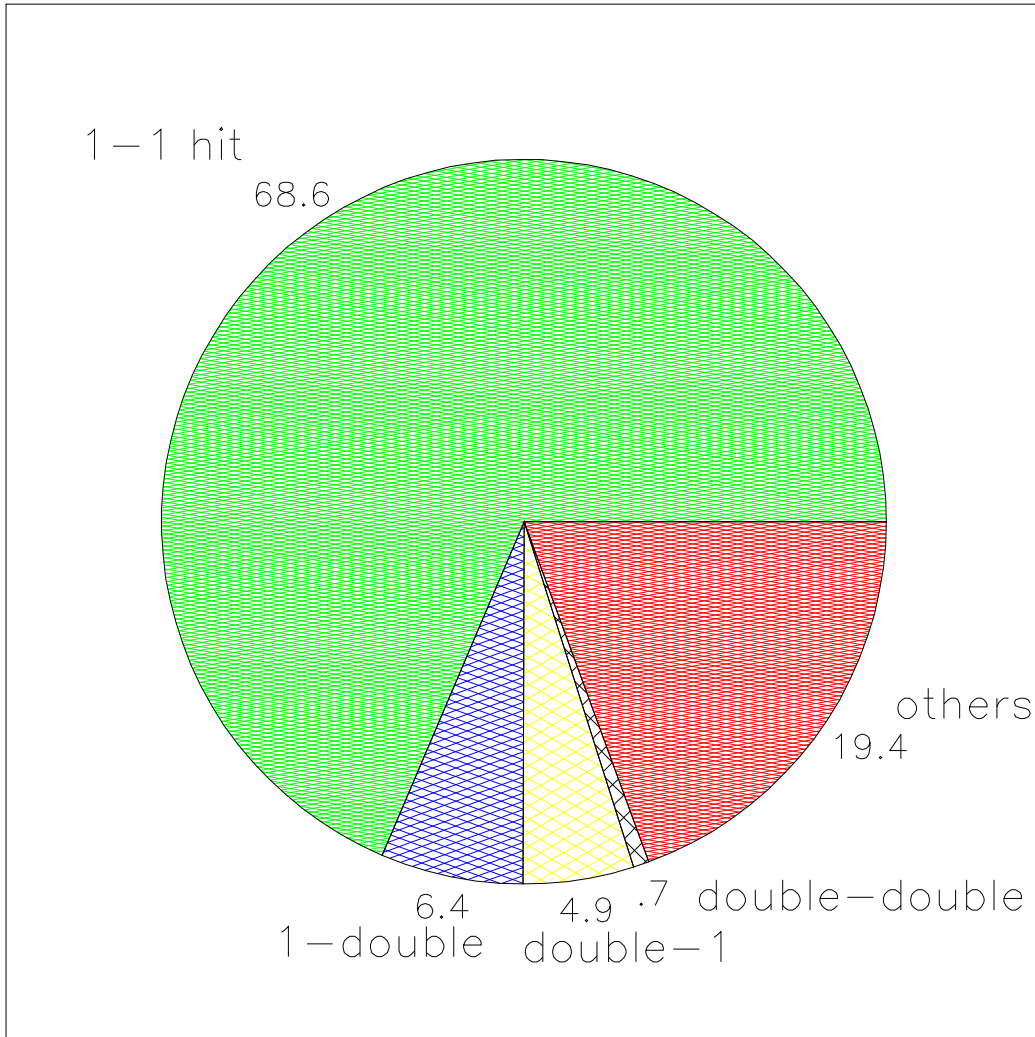


図 12: 2 hits event (下 TOF)

表 3: reject する evnet の hit pattern.

|               |               |               |               |               |           |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 1-20          | 1-(20,19)     | 1-19          | 1-(19,18)     | 1-18          | 1-(18,17) |
| 1-17          | (1,2)-20      | (1,2)-(20,19) | (1,2)-19      | (1,2)-(19,18) | (1,2)-18  |
| (1,2)-(18,17) | 2-20          | 2-(20,19)     | 2-19          | 2-(19,18)     | 2-18      |
| (2,3)-20      | (2,3)-(20,19) | (2,3)-19      | (2,3)-(19,18) | 3-20          | 3-(20,19) |
| 3-19          | (3,4)-20      | (3,4)-(20,19) | -             | -             | -         |

exp8/run7 event=356528



☒ 13: T0 trigger の hit-num rejection



め、ここでは電荷が負の粒子の曲がる方向を考慮して hit pattern を決定している) 図には double hit を含む pattern は記述されていないが、解析では 1-1 hit の reject pattern にはさまれた double-hit の pattern も reject している。表 3 にその一覧を載せることで 1-20 は TOF counter 1 と TOF counter 20 を通過する hit pattern である。rejection の結果を図 15、16 に示す。解析には hit-num rejection をかけた後のデータを使用している。

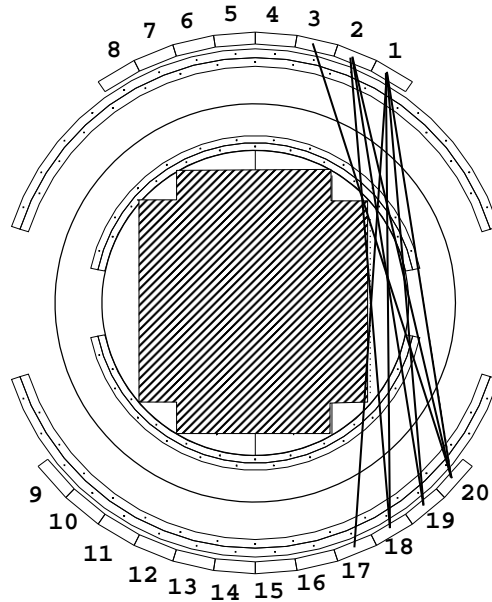


図 14: JET chamber の fiducial region (ハッチ部分) と TOF の reject pattern(直線)

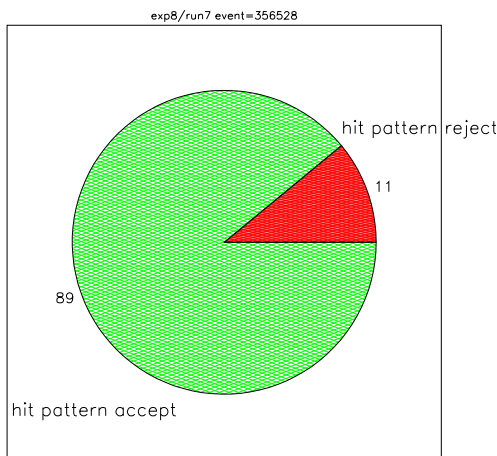


図 15: hit pattern selection

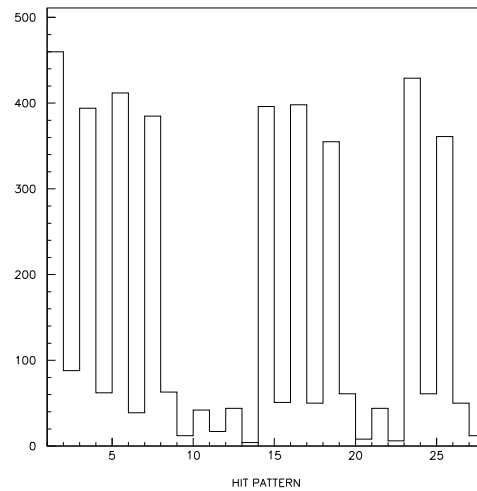


図 16: hit pattern のうちわけ。左から Table3 の順に並んでいる。

上記 2つの selection により、

$$80.4 \% (\text{hitnumrejection}) \times 89.0 \% (\text{hitpatternrejection})$$

$$= 71.6 \% (\text{total})$$

まで rejection することができる。現在の T0 trigger レートは上空で約 2.3kHz であり、Matrix coincidence

module を搭載することにより、1.6kHz までレートを下げることができる。'96 に Event builder を新しく搭載し、data acquisition にかかる時間を 1.2msec から  $180\mu\text{sec}$  に大幅に削減した ([16]) ことと各 module の clear の時間を最適化したことによる fast clear 時間の削減 ( $85\mu\text{sec} \rightarrow 25\mu\text{sec}$ ) と合わせ、不感時間は

$$\begin{aligned}\text{不感時間} &= 1400 \times 25 \times 10^{-6} + 200 \times 160 \times 10^{-6} \\ &= 0.071\end{aligned}$$

7%程度におさえることができるようになる。

#### 4.1.4 Annihilation event

BESS 測定器は測定器中で粒子が annihilation を起こさないように物質量を極力減らした設計になっている。しかし、物質量を 0 にすることはできないので (BESS の物質量は約  $15\text{mg}/\text{cm}^2$ )、実際には数%の反陽子 event は annihilation を起こしている。そのような event では下 TOF で複数の hit があるため、単純に hit counter の数で reject するわけにはいかない。しかし、1. 現在 BESS の解析では 1-1 hit を要求している、2. 複数の hits を認めると、track trigger の efficiency が悪くなる、という理由から現時点では annihilation event を accept する必要はないと思われる。将来的には transputer bank を用いた software selection により、JET の飛跡情報をもとにした rigidity cut が行なわれるようになるため annihilation event を含めた T0 trigger を処理することが可能となる。

## 4.2 高速 T0 trigger

### 4.2.1 T0 trigger と chamber の不感領域

BESS のデータの digitization は T0 trigger により起動されるため、T0 trigger は他の検出器の信号より速く出力されなければならない。しかしその生成にはある程度時間がかかるため、実際には drift chamber のワイヤー近傍 (ワイヤーから 5mm 以内) は不感領域となってしまう (図 17)。'97 以降では、T0 trigger 生成の scheme を変更するため、より速く T0 trigger を出力することが可能となり、この不感領域を削減することが出来る。以下では T0 trigger の高速化の方法について述べる。

### SIGMA Run48 corrected TRACK

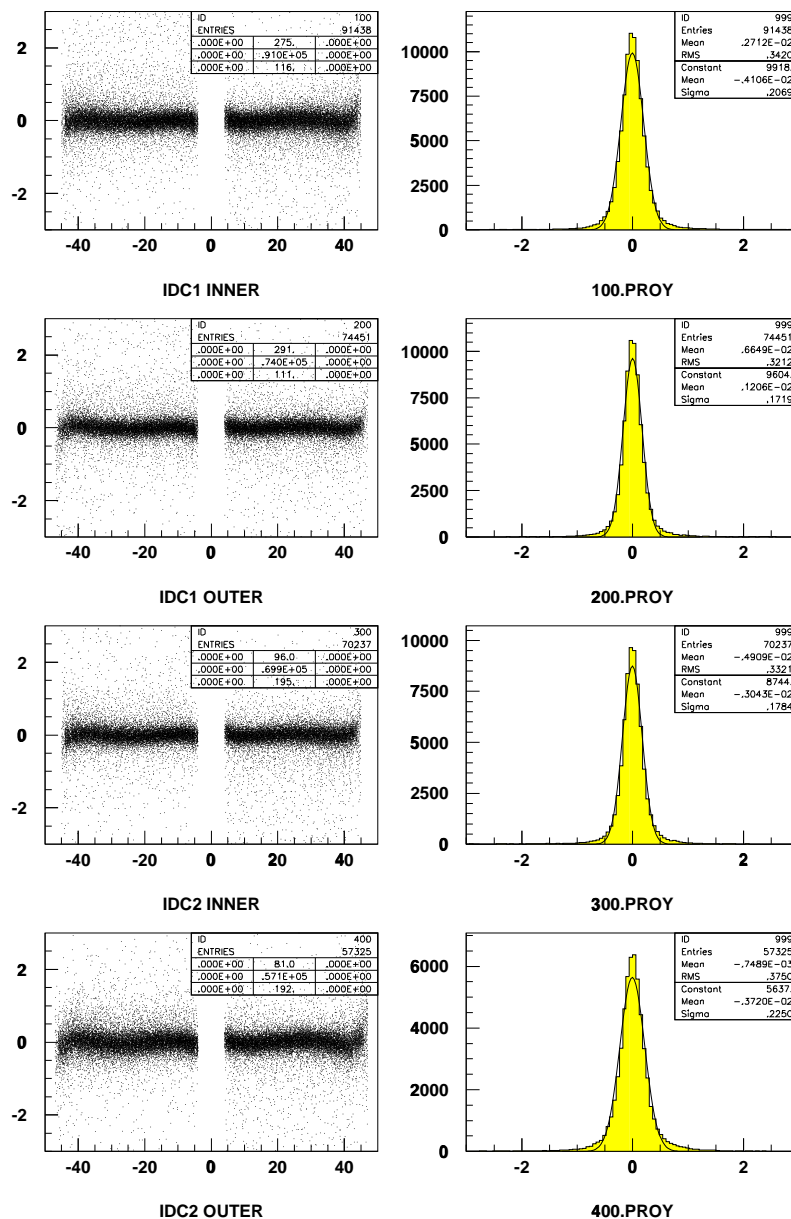


図 17: Drift chamber の不感領域。左の図は drift time から算出した wire からの距離 (mm) と、JET の飛跡情報をもとに割り出した wire からの距離との差異を plot したものである。wire から  $\pm 5$ mm の領域にはデータがないことがわかる。

### 4.2.2 T0 trigger の delay

現在 TOF counter が信号を出して T0 trigger が出力されるまで 140nsec 程度 delay がある。そのうちわけは、Analog sum 部分の 20nsec の delay、2Level discriminator module 内の 10nsec の delay、OR-module 内部の 20nsec の delay、T0 trigger module 内部の 85nsec の delay、module 間をつなぐケーブルによる 5nsec の delay となっている。Analog sum の部分の delay は左右の TOF counter の信号を summation する際、粒子の z-方向の通過位置による影響を和らげるため、コンデンサで信号をなまらせているためであり、そのせいで 20nsec の遅れが生じている。この analog sum についてはいろいろ議論があるが、1. 左右の信号を sum することにより、module(2Level-discriminator) の数を減らすことができる (つまり消費電力をおさえることができる)、2. TOF counter からの信号の z-dependence をどうするかについての代案がない、という二つの理由により今のところ使用し続けられている。2Level discriminator では内部に ECL<sup>10</sup> の IC を使用し、高速で discrimination を行なうことができているが、出力の際 TTL<sup>11</sup> Level に変換しており、そこが無駄となっている。これは 2Level discriminator の出力を受け付ける module(OR module) が TTL の IC を使用しているということ、さらに ECL の IC は消費電力が大きい、という理由によるものである。しかし ECL の信号を使えば Wire-OR<sup>12</sup> を用い OR gate を使用することなく論理 OR をとることができ、gate delay を削減することができる (つまり OR module は必要なくなる) というメリットがある。最後に T0 trigger module 内部の delay であるが、そのほとんどは  $\gamma$ -trigger のための設定に要する時間であり ( $\gamma$ -trigger の timing を保証するため、OR-module の出力【Lower-Low、Upper-High、Upper-Low】を 25nsec 遅らせているため coincidence が遅れてしまう、 $\gamma$ -trigger は rate が高すぎるため count down している、等) '97 以降我々は  $\gamma$ -trigger を止めるため、T0 trigger module による delay を大幅に delay を削減することができる。これについては次で詳しく述べる。

### 4.2.3 高速 T0 trigger module

前 subsection で述べた delay の削減を実現するために、新しい T0 trigger module(高速 T0 trigger module) を製作する。その特徴を以下にあげる。

- ECL の使用。
- Wire-OR の機能を使った gate の削減。
- TO trigger pattern の簡素化。
- count down の廃止。

まず論理演算に ECL を用いることにより、高速で信号を処理できるだけでなく、2Level-discriminator の出力を ECL で受けることができるようになり、OR-module を用いることなく Wire-OR で論理 OR をとることが可能となる。また T0 trigger 生成は Proton trigger のみ (Low threshold 信号の coincidence) で行ない、Helium trigger は sampling 信号としてのみ使用する。これは Helium-trigger(上下の TOF counter からの信号の High threshold の coincidence) が出力されるときには必ず Proton-trigger(Low threshold 信号の coincidence) が出力されるはずであるから、両者の OR をとる必要はないためである。これが T0 trigger pattern の簡素化ということであり、これにより Helium trigger は今まで通り TTL で出力することができ、ECL を使用することによる消費電力を半分におさえることができる。ユニバーサル基板を用いて上記改良を施したラッピング回路を製作し BESS のエレキに組み込んだテストを行なった結果、T0 trigger 信号は 70nsec 速くなることがわかった。

<sup>10</sup> **E**mitter **C**oupled **L**ogic. 高速で論理演算を行なうことができる。

<sup>11</sup> **T**ransistor **T**ransistor **L**ogic

<sup>12</sup> 回路の出力部をつなぐことにより、Gate を使用せずに OR をとる ECL のテクニック。

#### 4.2.4 高速化のメリット

高速 T0 trigger module を用いれば、T0 trigger の TOF counter の信号からの遅れを半減し、70nsec 程度の遅れで出力できる。Drift time と wire からの距離は図 18 のようになっており、70nsec 速くなれば、chamber の不感領域を wire 中心から  $\pm 4.0\text{mm}$  までにおさえることができるようになり、20%程度削減することができる。また、T0 trigger が速くなることにより、T0 trigger と timing を合わせるために行

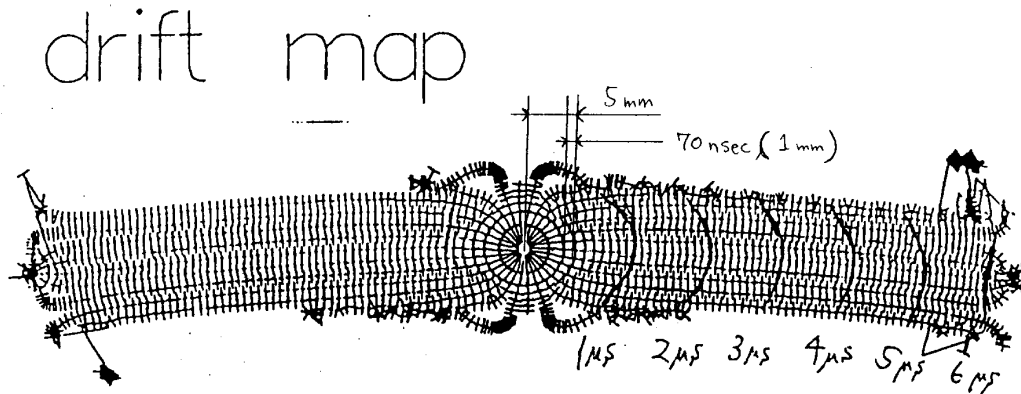


図 18: drift chamber の drift map[17]

なっている様々な delay を削減することができ、delay による信号のなまりを減少させることができる。特に TOF TDC の stop timing をあわせるために現在 34 芯 Flat cable を 40m も使用しており、これを削減することは重量に対しても効果がある。

#### 4.2.5 High charge trigger

高速 T0 trigger module を用いる場合、discriminator の出力を TTL から ECL に変更する必要があるため、現在の 2Level discriminator は そのままでは使用できない。また、T0 trigger を生成するのに必要な信号は Upper-Low、Lower-Low だけであるので、高速 T0 trigger module に入力する discriminator の Level は一つでよい。そこで、現在の TOF discriminator (2Level discriminator とほとんど同じ構造で、出力の極性が反対。Level が一つである代わりに出力が倍ある。) を改造し、ECL 出力の 1Level discriminator を作り Upper-Low、Lower-Low 信号を生成する。Upper-High、Lower-High 信号は別に作らなければならないので、TOF からの信号を二つにわけて、片方を 1Level discriminator もう片方を今まで通り 2Level discriminator に入力する。2Level discriminator ではもう 1Level threshold を設定できるので電荷 3 以上の粒子に対応する Level に threshold を設定し、High charge 用の trigger 信号を新たに生成する。図 19 に High charge 用 trigger を組み込んだ高速 T0 trigger module を用いた場合の trigger scheme を載せる。

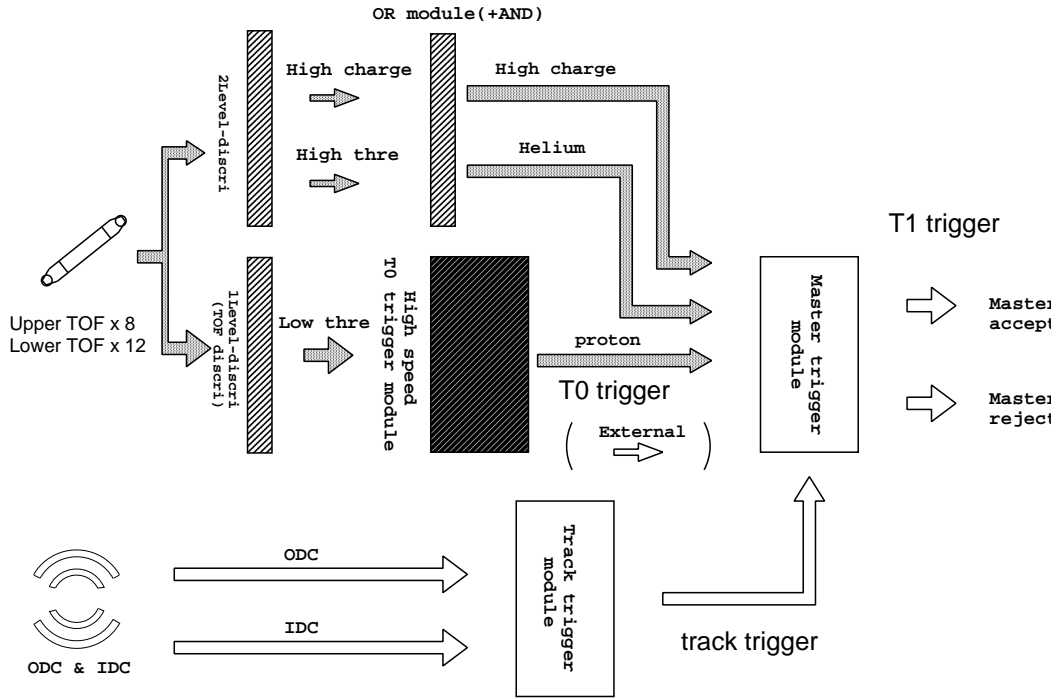


図 19: 高速 T0 trigger module を用いた trigger scheme

## 5 Track trigger の変更

### 5.1 TOF-IDC track trigger

#### 5.1.1 測定エネルギー領域と測定器

'97 以降 BESS では、現在より高いエネルギー領域の粒子を測定するため新しい粒子識別装置である Aerogel Čerenkov counter を搭載する。また、TOF counter の時間分解能を現在の 110psec から 80psec まで改良するとともに、粒子の飛行距離を伸ばすことでやはり粒子識別できるエネルギー領域を拡大する予定である。これらの改良を行なうため、現在 track trigger で使用されている ODC は外さなければならず、新しい 2nd Level trigger を作る必要がある。以下では新しい 2nd Level trigger として ODC の代わりに TOF counter の 信号を用いる TOF-IDC track trigger を使用する場合を考える。

#### 5.1.2 TOF 信号の Latch

TOF-IDC track trigger とは ODC の信号の代わりに TOF の信号を用いてつくる 2nd Level trigger である。BESS 開発当初の TOF counter は幅が広く (20cm)、粒子の tracking としては使用に耐えなかったが、時間分解能を改善するため counter の幅を 10 cm まで細くしたことにより ([15])、粒子の tracking に使用することが可能となっている。しかし track trigger が event selection を始めるのは T0 trigger が出力されてから  $8\mu\text{sec}$  後となるため (chamber からの信号は粒子の通過した位置により timing が  $0\text{--}7\mu\text{sec}$  と変動するため、delay をかけている) 何らかの方法で T0 trigger を出力した TOF counter の hit pattern をそこまで保っていなければならない。そこで TOF counter の信号を T0 trigger で Latch し、track trigger による event selection 時まで T0 trigger を出した TOF counter の hit pattern を保つようにする。最も簡単にこの変更を行なう方法として現在の OR-module に Latch の機能をつけた OR-Latch module (See Appendix B) を製作した。図 20、21 に OR-Latch module の簡単な論理回路とそのタイミングを示す。

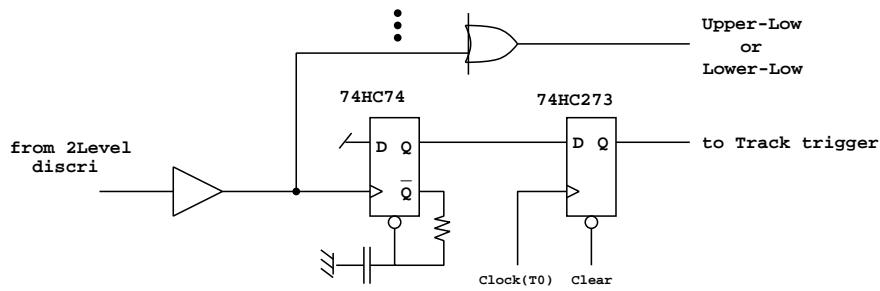


図 20: OR-Latch module 内部回路

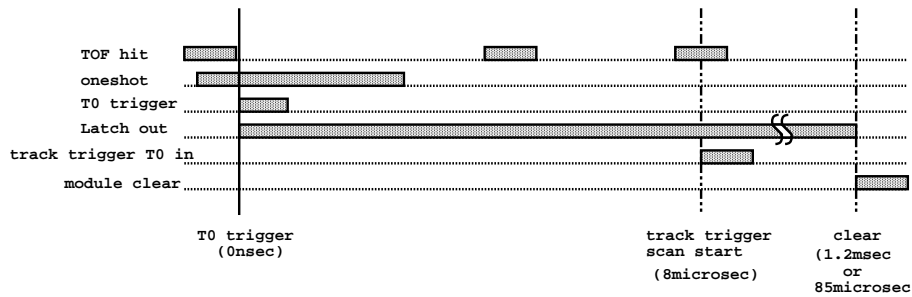


図 21: Latch timing

### 5.1.3 ODC-IDC track trigger との比較

図 22 は '95 年の track trigger の efficiency と TOF-IDC track trigger の efficiency を '95 年のデータを解析して出したものである。実線が '95 の ODC-IDC track trigger の efficiency であり、プロットが解析の結果である。二つを比べてみると TOF-IDC track trigger の efficiency は ODC-IDC の track trigger の efficiency より良くない。しかし、trigger がかったとき TOF counter は必ず hit している (ODC は missing がある) ことを考えると、trigger efficiency はそれほど変わらないと考えられる。また将来的には、track trigger の cut は緩めに設定して、trigger efficiency をあげ、その結果増えた trigger rate は transputer bank による software selection により reject することで対応する予定であるので、2nd trigger として TOF-IDC track trigger を用いることに問題はない。

### 5.2 高速 T0 trigger との組み合わせ

TOF-IDC track trigger は Matrix coincidence の概念を一步すすめて、TOF の信号で 2nd trigger も形成しようというものである。しかし先にも述べたように IDC からの信号を使用するため、reject 信号を出力するまでには  $8\mu\text{sec}$  以上時間がかかってしまう。そこで、Matrix coincidence による reject 信号を TOF-IDC による hit pattern selection 信号とは独立に生成し、TOF の hit pattern のみで reject できる event に対しては高速で reject 信号を出力してやることにより、不感時間をより削減することができるようになる。また、高速 T0 trigger との兼用も可能で、その場合は ECL 出力された Upper-Low、Lower-Low 信号の differential 出力 (ECL 信号は differential で入/出力される) の一方で Wire-OR を形成し、もう一方を Latch して、track trigger への信号を生成する。図 23 にその方法を示す。[18]

## P CLEAR EFFICIENCY

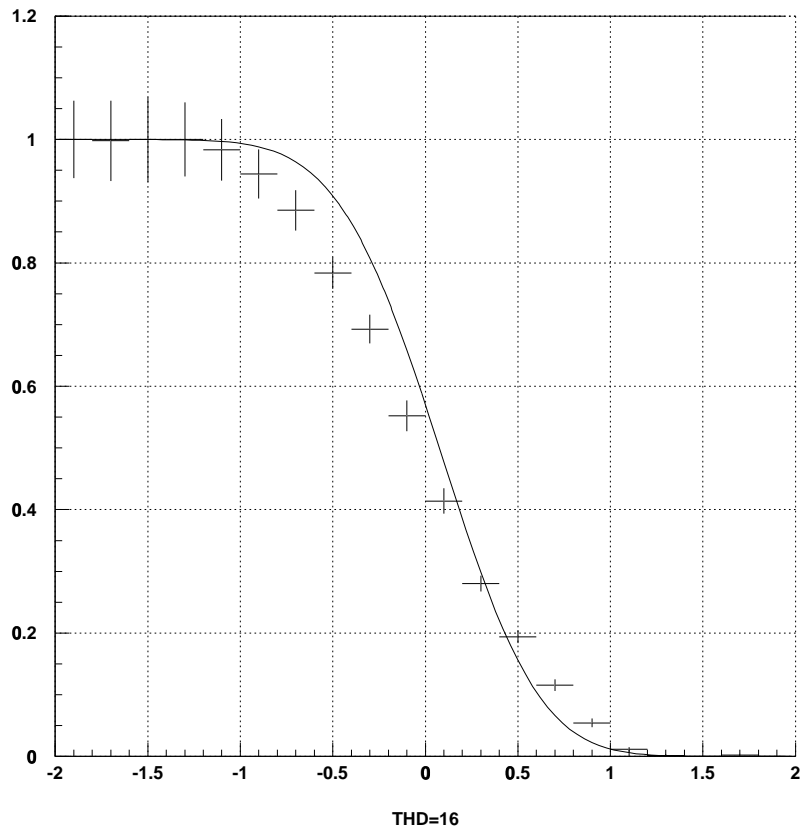


図 22: Track trigger の efficiency('95)

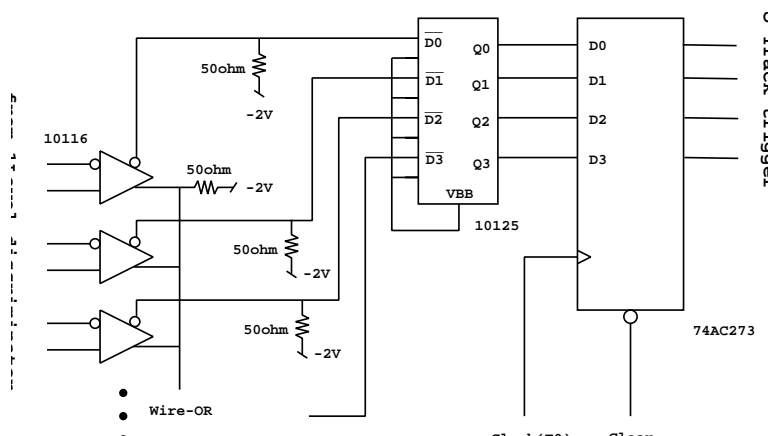


図 23: Wire-OR と Latch 生成



## 6 今後の展望

今回、BESS の trigger system を新たに構築し直す計画の第一段階として、主に T0 trigger の生成に関して研究を行ってきた。現実的な問題として Matrix coincidence module は エネルギー範囲を広げるため TOF の飛翔距離を伸ばすことに伴い、TOF counter の本数を 20 本から 22 本と増やすため、現段階では対応する SRAM(4Mbits) が販売されておらず、複数の小型 SRAM の連鎖で Matrix を構成しなければならないため、速さの問題 (50nsec 以下で T0 trigger を出力することが要請されている) が起こるため実現することは難しい。しかし、T0 trigger 生成としてではなく、2nd trigger の reject 機能の一部として使用するならば、十分高速 (現在 track trigger はその生成に  $8\mu\text{sec}$  以上かかっている) であり、track trigger との組み合わせで module 化すれば dead time の削減に役立てることができる。高速 T0 trigger module は検出器の upgrade に伴う trigger system の構成変更に対応することができ、今年の Flight に搭載するべく急ピッチで作業を進めている。現在最も実現可能性の高い trigger scheme は、高速 T0 trigger + TOF-IDC track trigger を使用する system である。残念ながら、今年の Flight には間に合わなかったが、Matrix coincidence rejection を組み込んだ 2nd trigger の製作も計画されており、より能率的な data 収集を行なうことができるようになる予定である。また、本論文では触れなかったが T1 trigger 生成に関して若干の問題点が指摘されており、T1 trigger を含めた trigger system の改善が今後の課題となっている。

## 7 謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導頂いた武田 廣 先生、野崎 光昭 先生、川越 清以 先生、本間 康浩 先生、横山 千秋 先生に心から深く感謝致します。また、本実験の指導的役割を果たしておられる東大の折戸教授、高エネルギー物理学研究所の山本教授にも大変お世話になりました。そして、度重なる失敗も暖かく見守ってくれた BESS Group の方々には感謝の言葉もありません。神戸大の諸先輩方には研究室に入った当初から実験だけでなく日常的なことにまでいろいろとお世話になりました。私と同期の方々、特に中沢 重晶氏には神戸での様々な事務手続きを私の代わりに行なって頂き、大変感謝しています。最後になりましたが、地震の時以来様々な面で私を助けてくれた田中 宏平氏、永野 孝明氏に心より感謝致します。

## 参考文献

- [1] F. W. Stecker, R. J. Protheroe, and D. Kazanas, *Astrophysics and Space Science* 96, 171 (1983)
- [2] J. Silk and M. Srednicki, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 624 (1984)
- [3] F. W. Stecker, S. Rudas, and T. F. Walsh, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 2622 (1985)
- [4] P. Kiraly, J. Wdowczyk, and A. W. Wolfendale, *Nature* 293, 120 (1981)
- [5] J. H. MacGibbons and B. J. Carr, *Ap. J.* 371 447 (1991)
- [6] S. Rosen, *Phys. Rev.* 158 1227 (1967)
- [7] R. J. Protheroe, *Ap.J.*, **251** 387 (1981)
- [8] S. A. Stephens and R. L. Golden , *Space Sci. Rev.* 46 (1987) 31
- [9] W. R. Webber and N. S. Potgieter, *Astrophys. J.* 344 (1989) 779
- [10] T. K. Gaisser and R. H. Maurer, *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1264 (1973)
- [11] M. Kobayashi, *Master thesis*, (1996)
- [12] K. Suzuki, *Master thesis*, (1996)
- [13] S. Nakazawa, *Master thesis*, (1997)
- [14] K. Yoshimura (*et al*), *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3792 (1995)
- [15] H. Matumoto, *Master thesis*, (1994)
- [16] T. Maeno, *Master thesis*, (1997)
- [17] T. Haga, *Master thesis*, (1991)
- [18] *MOTOROLA INC. MECL SYSTEM DESIGN HANDBOOK*

## A Matrix coincidence module 回路図

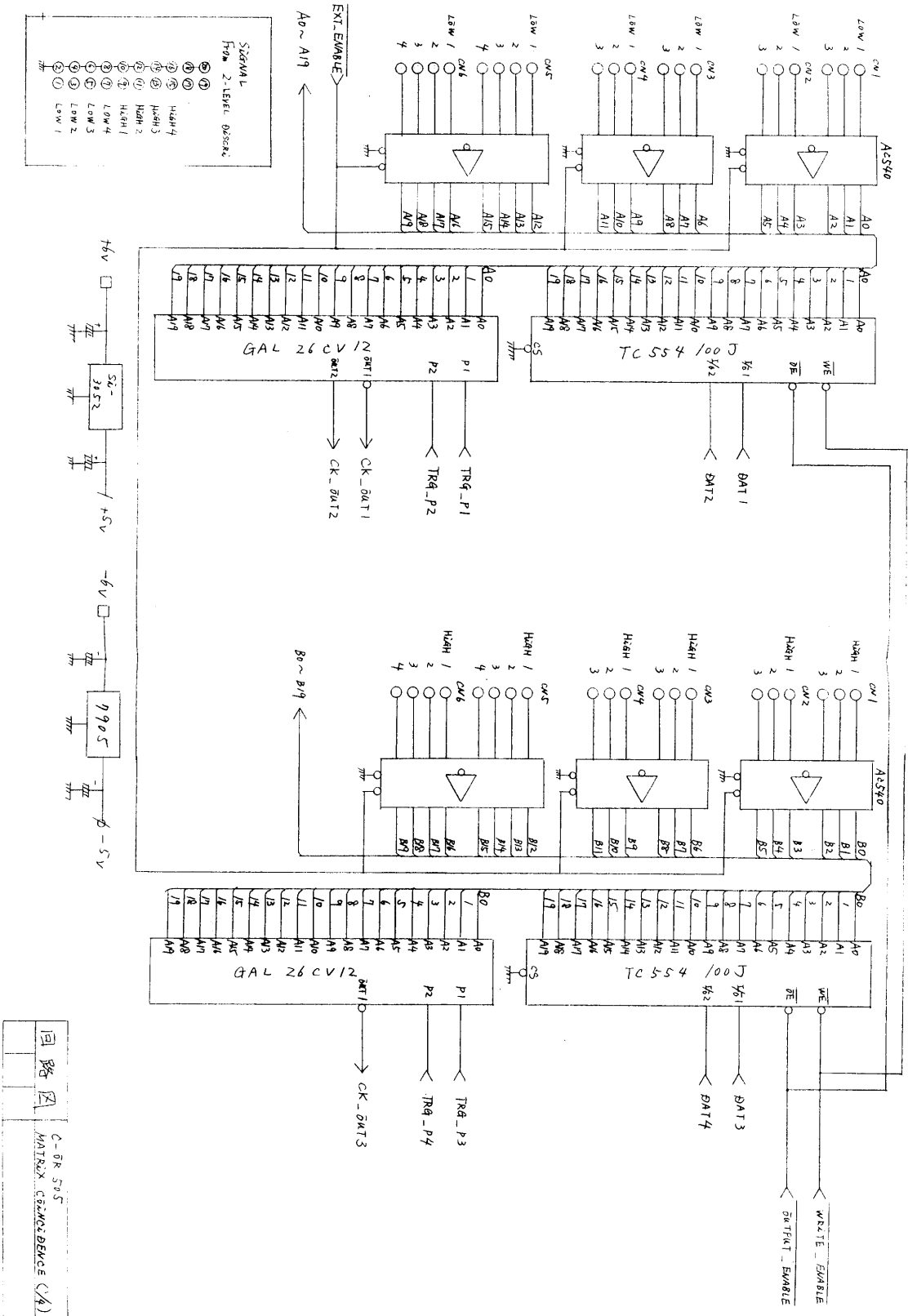


图 24: Matrix coincidence module 回路图 1

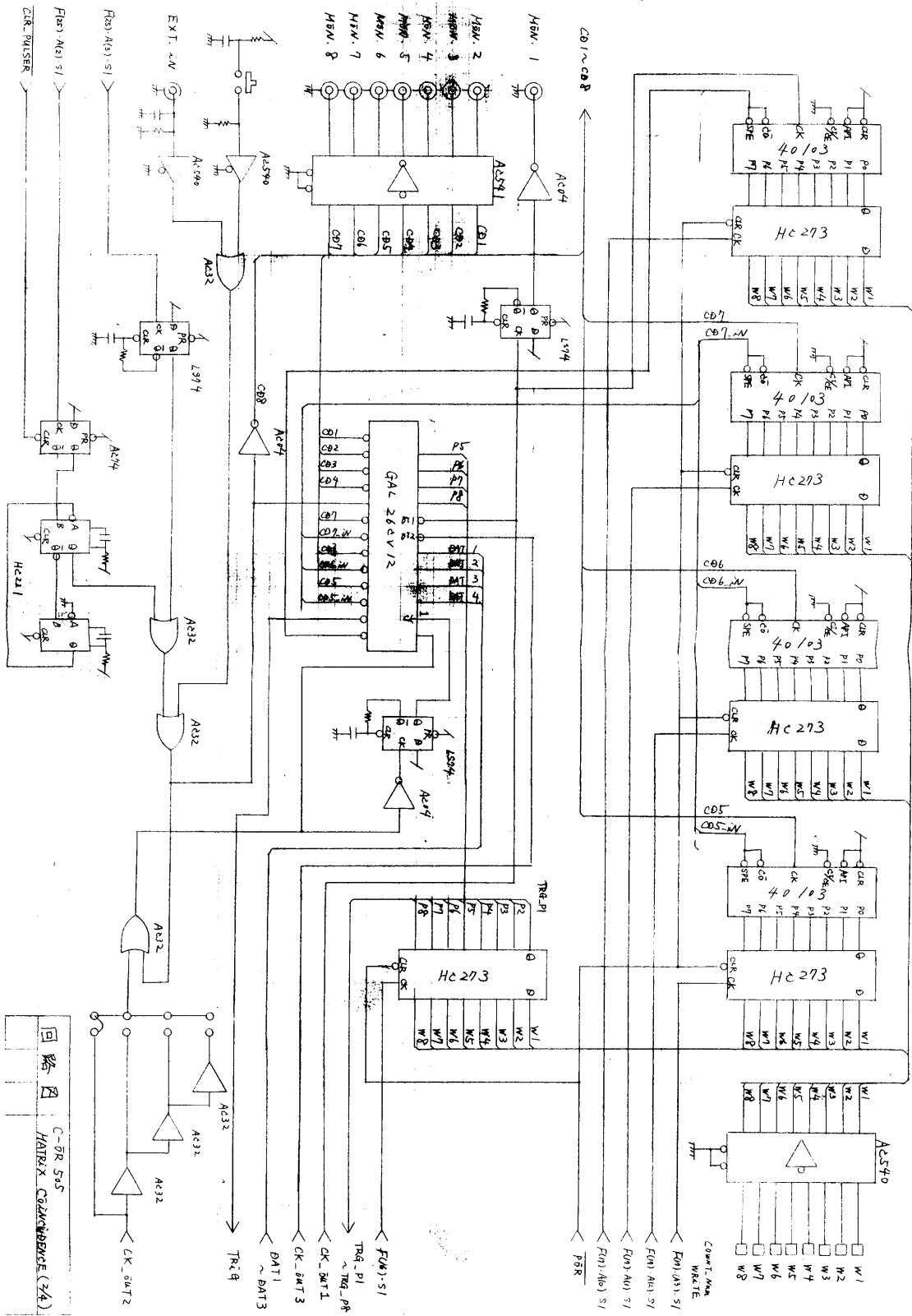
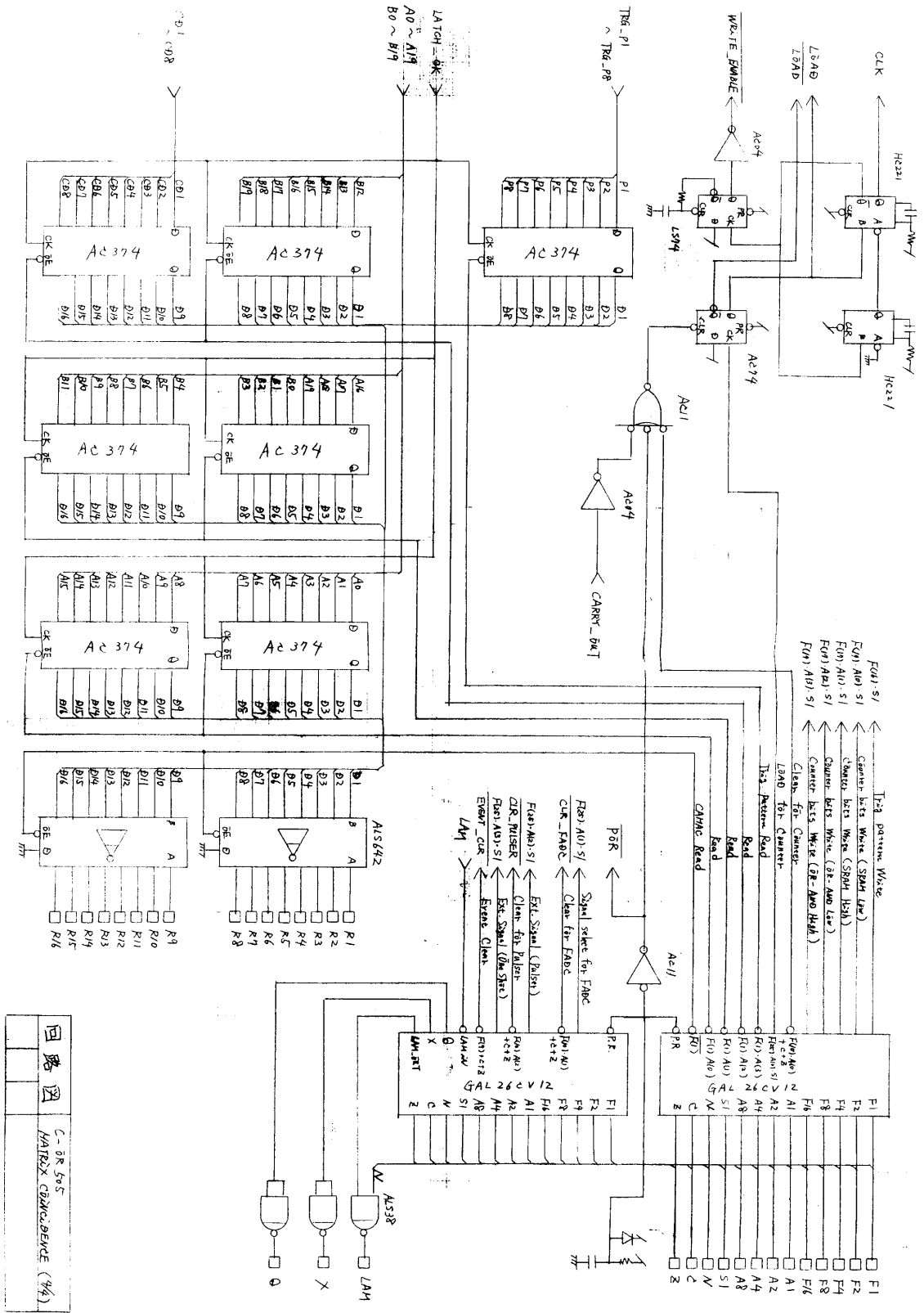


图 25: Matrix coincidence module 回路图 2





☒ 27: Matrix coincidence module 回路图 4

## B OR-Latch module 回路図



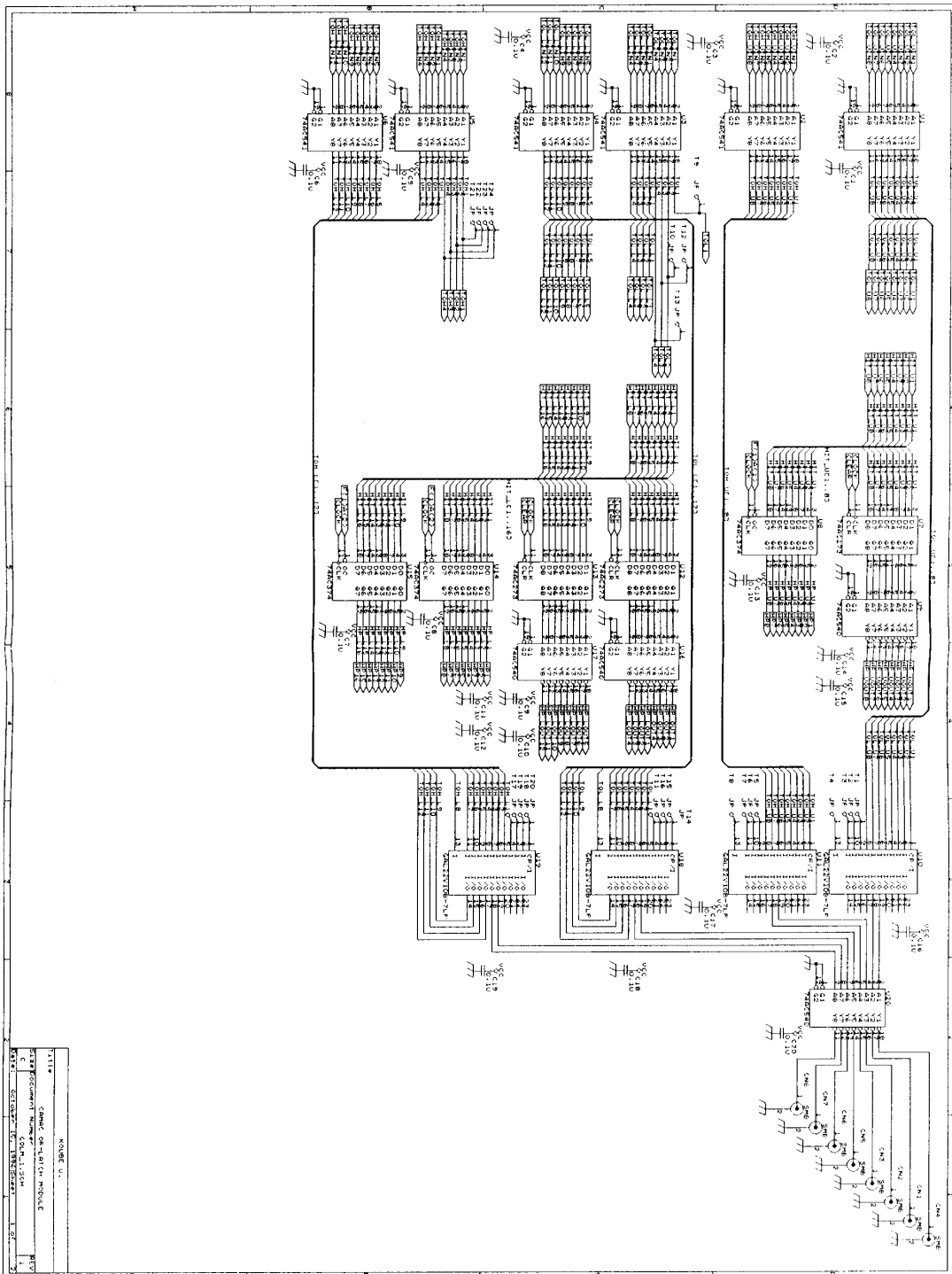


图 28: OR Latch module 回路图 1

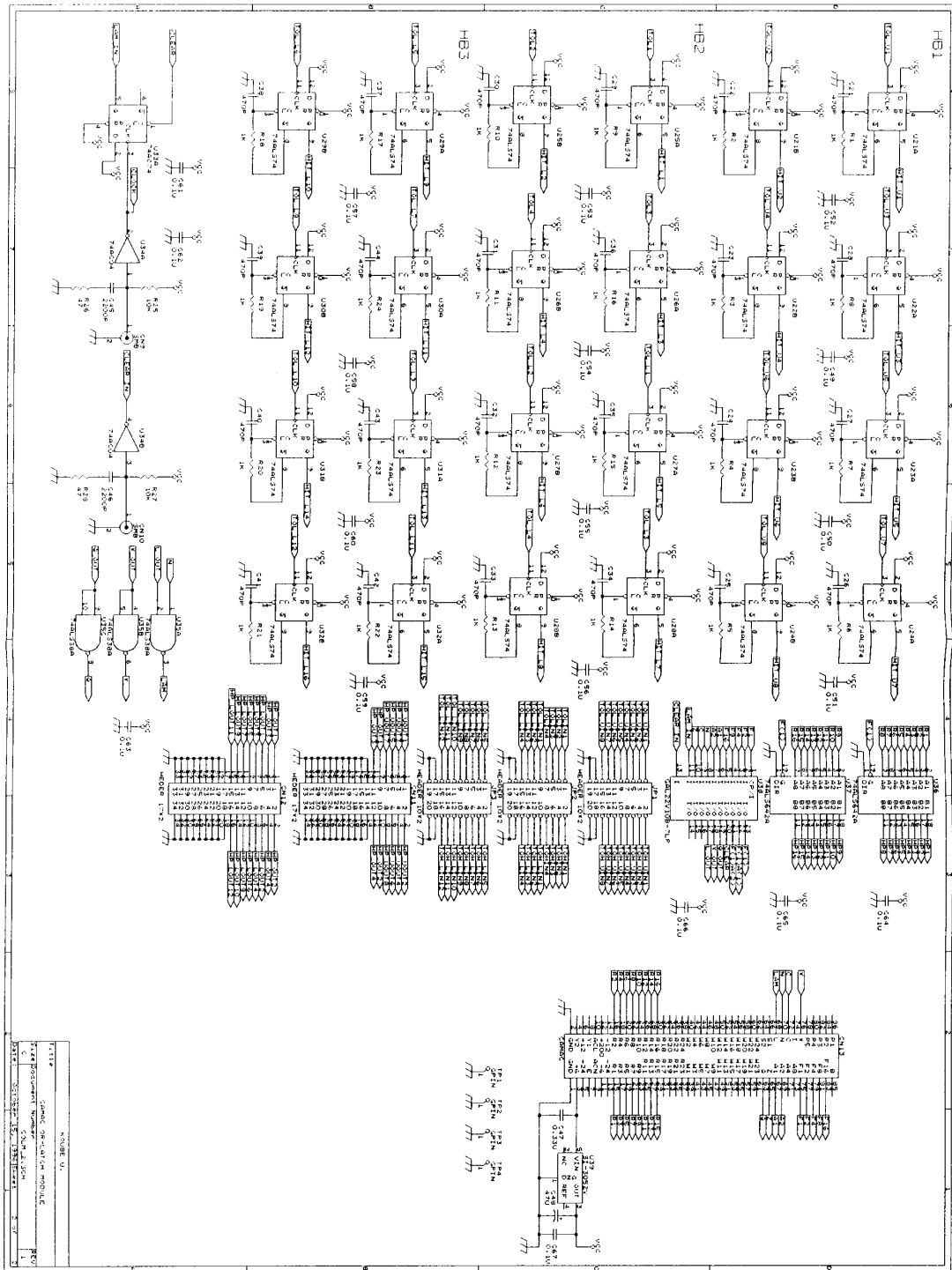


图 29: OR Latch module 回路图 2