

修士論文

国際リニアコライダーのビーム形状測定のための
ペアモニターの研究

～ Study of the pair monitor for beam shape
measurement at the International Linear Collider ～

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

山口 信二郎

平成27年

概要

現在の素粒子物理では、標準模型が強い相互作用、弱い相互作用、電弱相互作用をうまく説明しており、高エネルギーと低エネルギー両方の実験結果によってその正当性がよく検証されている標準的な理論である。しかし、未だに標準模型では説明できていない現象も多く残っており、そのような事象を説明するために新粒子、新相互作用を組み込んだ新しい理論が数多く提起されている。これらの新理論や、標準理論について、高エネルギーな粒子群 (バンチ) の衝突を行い、その正当性を検証する為に設計されているのが国際リニアコライダー (以下、ILC) である。ILC 実験の成功の鍵を握る要素の 1 つに、ビームチューニングがある。ILC では統計量を得る為に、バンチのサイズをこれまでの高エネルギー実験で例を見ないような、数 nm オーダーの非常に小さく絞り込んで衝突を行うが、それ故にそのようなバンチの生成や、衝突が非常に困難となる。これを成功させる為には理想的なバンチが生成出来ているか、衝突が理想的に行われているかモニタリングしながらバンチのチューニングを行う必要がある。このモニタリングを行う為に用いられるのが本研究テーマであるペアモニターである。ペアモニターはバンチ衝突時に生成される Pair background と呼ばれる電子、陽電子を観測することでバンチのサイズ、位置のずれを数 nm オーダーで検出し、それを加速器にフィードバックし、ビームチューニングを行う。本研究ではバンチシミュレーションによってペアモニターで取得できるバンチ情報の検証を行い、また、ペアモニターの具体的な回路設計とその評価を行った。

目次

第1章	国際リニアコライダー (ILC : International Linear Collider) 実験	1
1.1	探索する物理	1
1.2	ILC のデザイン	4
1.3	ILD 測定器 (ILD : International Large Detector)	6
1.3.1	概要	6
第2章	ペアモニター	10
2.1	概要	10
2.2	測定原理	12
2.3	運転時の測定手順と仮定	14
2.3.1	ビームサイズが大きい段階	14
2.3.2	ビームサイズが小さい段階	14
2.4	現行のデザイン	15
2.5	研究課題	16
第3章	ビームシミュレーション	18
3.1	概要	18
3.2	シミュレーションソフト	21
3.2.1	CAIN	21
3.3	シミュレーション結果	22
3.3.1	生成される Pair background の総数の類似性について	22
3.3.2	生成される Pair background の速度方向の類似性について	32
3.4	まとめと今後	37
3.4.1	まとめ	37
3.4.2	今後	38

第4章	SOI-CMOS型読み出し回路の開発課題と構成	40
4.1	SOI-CMOSプロセスについて	40
4.2	回路構成	41
4.2.1	回路全体の大まかな動作	41
4.2.2	ピクセル回路の大まかな動作	43
4.2.3	各信号のまとめ	45
4.2.4	TOP_PM02	48
4.2.5	CORE4	50
4.2.6	CAP_DIGITAL	51
4.2.7	COUNT4	52
4.2.8	EDFFC	53
4.2.9	DFFC	54
4.2.10	CAP_TOP	55
4.2.11	CAP_LEFT	57
4.2.12	CAP_RIGHT	58
4.2.13	Gray2Binary	59
4.2.14	CAP_BOTTOM	61
4.2.15	CAP_ANALOG	62
4.2.16	BIASLN	63
4.2.17	BIAS	63
4.2.18	PM02_PIXEL	64
4.2.19	ANALOG	65
4.2.20	ABUFH	66
4.2.21	ABUFL	67
4.2.22	DCFB	68
4.2.23	PRC	69
4.2.24	RF1L	70
4.2.25	SW1	71
4.2.26	COMP1	72
4.2.27	DAC6	72
4.2.28	SW4	73
4.2.29	SW8	74
4.2.30	TRBUF_CO	74
4.2.31	LCR	75
4.2.32	REGBNK16	76

4.2.33	COUNT8	79
4.2.34	LATCH8	79
4.2.35	LATCHC	80
4.2.36	DEC2B	81
第5章	回路シミュレーション	83
5.1	ペアモニターの読み出し回路が抱えていた課題	83
5.2	研究課題	83
5.3	シミュレーションソフト	84
5.3.1	S-Edit	84
5.3.2	T-Spice	84
5.3.3	W-Edit	84
5.4	シミュレーション条件	85
5.5	基準電流を流す為の抵抗値について	85
5.5.1	シミュレーション内容	86
5.5.2	結果	86
5.6	XCK,YCK,XSELOUT,YSELOUT,INITB の評価	87
5.6.1	シミュレーション内容	87
5.6.2	結果	88
5.7	LCR(Local Control) の評価	89
5.7.1	シミュレーション内容	89
5.7.2	結果	90
5.8	COUNT8 の評価	91
5.8.1	シミュレーション内容	92
5.8.2	結果	93
5.9	REGBNK16 の初期回路の評価	94
5.9.1	シミュレーション内容	96
5.9.2	結果	97
5.9.3	おかしい挙動の原因についての考察	98
5.10	REGBNK16 Read 中の SEL 信号生成の為の STRB による Load を防ぐ為の回路修正とその評価	101
5.10.1	シミュレーション内容	101
5.10.2	結果	102
5.10.3	SEL0 に対応する LATCH8 の出力がおかしい事に関する考察	103

5.11	REGBNK16 操作性向上の為と、Debug 動作を可能にする 為の修正とその評価	104
5.11.1	シミュレーション内容	106
5.11.2	結果	106
5.12	その他の回路修正	107
5.12.1	CAP_TOP で作られる XSEL,XSELOUT の Reset に関する回路修正	107
5.12.2	CAP_LEFT で作られる YSEL,YSELOUT の Reset に関する回路修正	109
5.13	回路シミュレーションのまとめと今後	111
5.13.1	まとめ	111
5.13.2	今後	112
第 6 章	まとめ	113
	謝辞	115

目次

1.1	$e^+e^- \rightarrow Zh$	3
1.2	ILC の各エネルギー領域において探索する物理	4
1.3	ILC 全体図	5
1.4	ILC ビームパラメーター	5
1.5	SiD の全体図と断面図	6
1.6	ILD の全体図と断面図	7
1.7	Push-Pull 方式	8
1.8	FCAL	9
2.1	Beamstrahlung	12
2.2	ペアモニターの概略図	15
2.3	Pair background が螺旋運動をしてペアモニターに届く様子	16
3.1	IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性： TDR	23
3.2	IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性： RDR	24
3.3	IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性： TDR と RDR の比較	25
3.4	IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性： TDR	26
3.5	IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性： RDR	27
3.6	IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性： TDR と RDR の比較	28
3.7	IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性： TDR	29
3.8	IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性： RDR	30

3.9	IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性 : TDR と RDR の比較	31
3.10	IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_x 依 存性 : TDR	33
3.11	IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_x 依 存性 : RDR	33
3.12	IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_y 依 存性 : TDR	34
3.13	IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_y 依 存性 : RDR	35
3.14	IP で生成される Pair background の速度角度分布の δ_y 依 存性 : TDR	36
3.15	IP で生成される Pair background の速度角度分布の δ_y 依 存性 : RDR	36
4.1	SOI 検出器	40
4.2	回路全体の動作	42
4.3	ピクセルの内部回路の動作	45
4.4	TOP_PM02	49
4.5	TOP_PM02	50
4.6	CORE4	51
4.7	CAP_DIGITAL	52
4.8	COUNT4	53
4.9	EDFFC	54
4.10	DFFC	55
4.11	CAP_TOP	57
4.12	CAP_LEFT	58
4.13	CAP_RIGHT	59
4.14	Gray2Binary	60
4.15	CAP_BOTTOM	62
4.16	CAP_ANALOG	62
4.17	BIASLN	63
4.18	BIAS	64
4.19	PM02_PIXEL	65
4.20	ANALOG	66
4.21	ABUFH	67

4.22	ABUFL	68
4.23	DCFB	69
4.24	PRC	70
4.25	RF1L	71
4.26	SW1	71
4.27	COMP1	72
4.28	DAC6	73
4.29	SW4	74
4.30	SW8	74
4.31	TRBUF_CO	75
4.32	LCR	75
4.33	REGBNK16	78
4.34	COUNT8	79
4.35	LATCH8	80
4.36	LATCHC	81
4.37	DEC2B	81
5.1	IIN1 と抵抗値 R	85
5.2	IIN1 に流れる電流と抵抗値	86
5.3	XCK,YCK,XSELOUT,YSELOUT,INITB の評価	88
5.4	LCR	89
5.5	WR,WCK,DIN,DOUT の評価	90
5.6	COUNT8	91
5.7	COUNT8 のシミュレーション結果	93
5.8	REGBNK16 初期回路	95
5.9	REGBNK16 初期回路のシミュレーション結果	97
5.10	おかしい挙動の原因に関する図	100
5.11	REGBNK16 1 回目の修正後の回路と修正前の回路の比較	101
5.12	REGBNK16 1 回目の修正後のシミュレーション結果	102
5.13	SEL0 信号の挙動に関する考察	103
5.14	REGBNK16 1 回目の修正と 2 回目の修正の比較	105
5.15	1 回目の修正と本修正の Q0~Q7 の出力結果の比較	106
5.16	1 回目の修正と本修正の LOADB の出力結果の比較	107
5.17	修正前と修正後の CAP_TOP の比較	108
5.18	修正前と修正後の CAP_LEFT の比較	110

表 目 次

1.1	SiD の規格	6
1.2	ILD の規格	7
2.1	高エネルギー実験のビームサイズ	11
3.1	先行研究時からの ILC ビームパラメーターの変化	18
4.1	10 進数と Binary Code, Gray Code の対応	61
4.2	LCR の Q0~Q10B の使用用途	76
4.3	A0,A1 と Q0~Q3 の対応表	82

第1章 国際リニアコライダー (ILC : International Linear Collider) 実験

1.1 探索する物理

現在、素粒子物理学では標準理論と呼ばれる理論モデルが、強い相互作用、弱い相互作用、電弱相互作用をよく説明し、17種類の素粒子を含んでおり、この理論の整合性は高エネルギー領域、低エネルギー領域の両方で示されている。このような成功的な標準理論ではあるが、未だに説明できない事象があり、問題点を抱えている。その未解決な問題の埋め合わせをするには新粒子や新しい相互作用が必要になる。標準理論が抱える主要な問題点として、

- 1) 重力がどのように自然界の他の力と関係しているかを説明出来ない。
- 2) なぜ物質を構成する基本粒子(素粒子)はクォーク、レプトンであるかを説明出来ず、また、これらの素粒子は何種類存在すべきかも説明出来ない。
- 3) 天文学的にその存在があると予言されているダークマターを説明する粒子の候補がない。
- 4) 宇宙には通常物質(陽子、中性子などのバリオンや電子など)に対応する量の反物質が自然に存在しないことを説明出来ない。
- 5) 標準理論は電弱対称性に基づいており、これは素粒子の質量の生成を禁止するものである。しかし宇宙はこの対称性を破っており、これによって標準理論が含む素粒子達に質量を与えている他、その他の基本的な性質も導かれる。標準理論ではこの電弱対称性の破れを1つのヒッグス場と呼ばれる場を仮定することによって説明してい

るが、これは1つの仮定に過ぎず、その正当性は示されていない。また、このヒッグス場は自分自身の場の性質を説明することが出来ない。

という5つが挙げられる [1]。3) に関連して、現在標準理論以外の理論ではヒッグス場を説明するようなモデルが幾つか存在しているが、そのような理論モデルではダークマターの候補となる粒子も予言されていることが多い。更に、ダークマター粒子の質量は数 100GeV オーダーであり、ヒッグス場から質量を受け取る粒子の中で最も重いものの1つであるという主張もなされている。また、4) に関連して、反バリオンとは違い宇宙に多く存在しているバリオンは CP 対称性を破るヒッグス場における相互作用により生じ得る。より一般的に、100GeV を超えるような物理理論モデルでは必ずヒッグス場を含んでいなければならない、また、その理論枠組の中でその場自体を説明できなければならない。

このように素粒子物理学に於いて重要な存在であるヒッグス場であるが、その存在やその相互作用を研究するためには、ヒッグス場の量子であるヒッグスポソン (ヒッグス粒子) を観測し、研究を行う事になる。国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) の主要な研究テーマはヒッグス粒子であり、またそれに関連して、その他の新粒子の探索も行うことが出来ると期待されている加速器である。ILC ではヒッグス場の性質とその起源を、詳細に研究できる。

2012年6月、スイスとフランスの国境にある CERN 研究所の Large Hadron Collider : LHC に於いて、ATLAS 実験と CMS 実験は 125GeV の質量を持つ新粒子の発見をアナウンスし、また、この粒子の多くの性質は標準理論のヒッグス粒子と一致するものであった。LHC 実験はまた、ヒッグス粒子が 600GeV 以上の質量を持つ可能性も排除した。ILC は LHC で見つかった、標準理論のヒッグス粒子の性質を持つこの 125GeV の粒子 (以下からは単にヒッグス粒子と呼ぶ) を研究するための理想的な装置である。この粒子がもし、幾つかの理論で予言されている複数のヒッグス粒子の内の1つであり、また、これとは違うボソンが W, Z ボソンの質量に主として寄与しているのであれば、その粒子も必ず ILC で観測される事になる。従って ILC はヒッグス場とその素粒子物理への暗示を研究する為の、確実に直接的な方法であると言える。

ILC で観測する物理の1つに、250GeV 重心系エネルギーで $e^+e^- \rightarrow Zh$ という、125GeV のヒッグス粒子が関与している反応を検証する為の実験がある (図 1.1)。

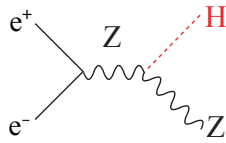


図 1.1: [1] $e^+e^- \rightarrow Zh$

この反応では、ヒッグス粒子に対する適切な反跳エネルギーを持つ Z ボソンの特定を行う事で、正しくヒッグス粒子の存在を確認する事が出来る。この実験設定では、たとえヒッグス粒子が観測出来ないような粒子に崩壊したとしても、ヒッグス粒子の全崩壊レートを高精度で計測する事が出来る。このような崩壊過程を、標準理論での背景事象から区別することは LHC では困難である。ヒッグス粒子が様々なクォークやレプトン、ボソンなどに崩壊するレートを正確に計測する事は、ヒッグス場が単一でこれらの粒子に質量を与えているのか、または、そのパートナーとなるような場が存在し、それに対応する新粒子が存在するのかどうかという疑問の証拠を与える事になる。これらは上で挙げた素粒子物理の疑問の 1 つである。

ILC はこの他にも様々なエネルギー領域で、新しい相互作用の探索や新粒子の探索、超高精度での既存の粒子の観測などを行う。図 1.2 はこれらの物理目標とそのエネルギー領域を示したものである。

Energy	Reaction	Physics Goal
91 GeV	$e^+e^- \rightarrow Z$	ultra-precision electroweak
160 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$	ultra-precision W mass
250 GeV	$e^+e^- \rightarrow Zh$	precision Higgs couplings
350–400 GeV	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ $e^+e^- \rightarrow WW$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$	top quark mass and couplings precision W couplings precision Higgs couplings
500 GeV	$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$ $e^+e^- \rightarrow Zhh$ $e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$ $e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$	precision search for Z' Higgs coupling to top Higgs self-coupling search for supersymmetry search for extended Higgs states
700–1000 GeV	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}hh$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}VV$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}t\bar{t}$ $e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$	Higgs self-coupling composite Higgs sector composite Higgs and top search for supersymmetry

図 1.2: [1]ILC の各エネルギー領域において探索する物理の一覧表

1.2 ILC のデザイン

ILC は、重心系エネルギー 200-500 GeV の高ルミノシティな電子・陽電子衝突線形加速器である (図 1.3)。全長は約 31 km であり、高加速勾配の 1.3 GHz の超伝導加速空洞を用いることによってこの高エネルギーを実現する。アップグレードとしてルミノシティを 2 倍にする実験 (L Upgrade) や、2 パターンの重心系エネルギーを 1 TeV にする実験 (E_{CM} Upgrade A or B) も計画されている。200~500 GeV のエネルギー領域や、各アップグレードをした際に用いられるビームパラメーターも具体的に設定されている (図 1.4)。

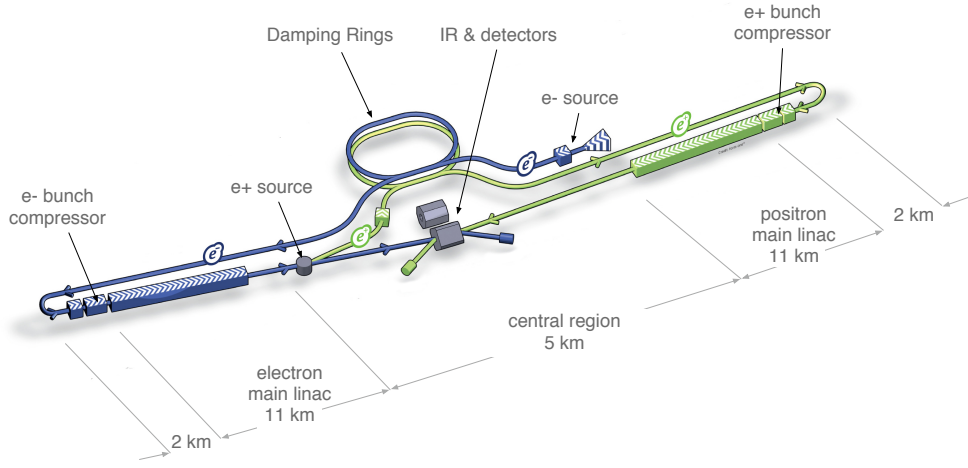


図 1.3: [1]ILC 全体図

			Baseline 500 GeV Machine			1st Stage	L Upgrade	E_{CM} Upgrade	
			250	350	500	250	500	A	B
Centre-of-mass energy	E_{CM}	GeV	250	350	500	250	500	1000	1000
Collision rate	f_{rep}	Hz	5	5	5	5	5	4	4
Electron linac rate	f_{linac}	Hz	10	5	5	10	5	4	4
Number of bunches	n_b		1312	1312	1312	1312	2625	2450	2450
Bunch population	N	$\times 10^{10}$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.74	1.74
Bunch separation	Δt_b	ns	554	554	554	554	366	366	366
Pulse current	I_{beam}	mA	5.8	5.8	5.8	5.8	8.8	7.6	7.6
Main linac average gradient	G_a	$MV m^{-1}$	14.7	21.4	31.5	31.5	31.5	38.2	39.2
Average total beam power	P_{beam}	MW	5.9	7.3	10.5	5.9	21.0	27.2	27.2
Estimated AC power	P_{AC}	MW	122	121	163	129	204	300	300
RMS bunch length	σ_z	mm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.250	0.225
Electron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.190	0.158	0.124	0.190	0.124	0.083	0.085
Positron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.152	0.100	0.070	0.152	0.070	0.043	0.047
Electron polarisation	P_-	%	80	80	80	80	80	80	80
Positron polarisation	P_+	%	30	30	30	30	30	20	20
Horizontal emittance	$\gamma\epsilon_x$	μm	10	10	10	10	10	10	10
Vertical emittance	$\gamma\epsilon_y$	nm	35	35	35	35	35	30	30
IP horizontal beta function	β_x^*	mm	13.0	16.0	11.0	13.0	11.0	22.6	11.0
IP vertical beta function	β_y^*	mm	0.41	0.34	0.48	0.41	0.48	0.25	0.23
IP RMS horizontal beam size	σ_x^*	nm	729.0	683.5	474	729	474	481	335
IP RMS vertical beam size	σ_y^*	nm	7.7	5.9	5.9	7.7	5.9	2.8	2.7
Luminosity	L	$\times 10^{34} cm^{-2}s^{-1}$	0.75	1.0	1.8	0.75	3.6	3.6	4.9
Fraction of luminosity in top 1%	$L_{0.01}/L$		87.1%	77.4%	58.3%	87.1%	58.3%	59.2%	44.5%
Average energy loss	θ_{BS}		0.97%	1.9%	4.5%	0.97%	4.5%	5.6%	10.5%
Number of pairs per bunch crossing	N_{pairs}	$\times 10^3$	62.4	93.6	139.0	62.4	139.0	200.5	382.6
Total pair energy per bunch crossing	E_{pairs}	TeV	46.5	115.0	344.1	46.5	344.1	1338.0	3441.0

図 1.4: [1]ILC ビームパラメーター

1.3 ILD 測定器 (ILD : International Large Detector)

1.3.1 概要

ILC では高精度の物理パフォーマンスを実現する為に、測定器は前例の無いような、挑戦的な性能が要求される。特に検出器の部分ではこの性能を実現する為の測定器が2つ設計されている。SiD(Silicon Detector)とILD(International Large Detector)である。

SiD(Silicon Detector)

大きさ	高さ約 13m 長さ約 12m
磁場の強さ	5T
中央飛跡検出器	全てシリコン検出器
主な開発グループ	アメリカ

表 1.1: SiD の規格

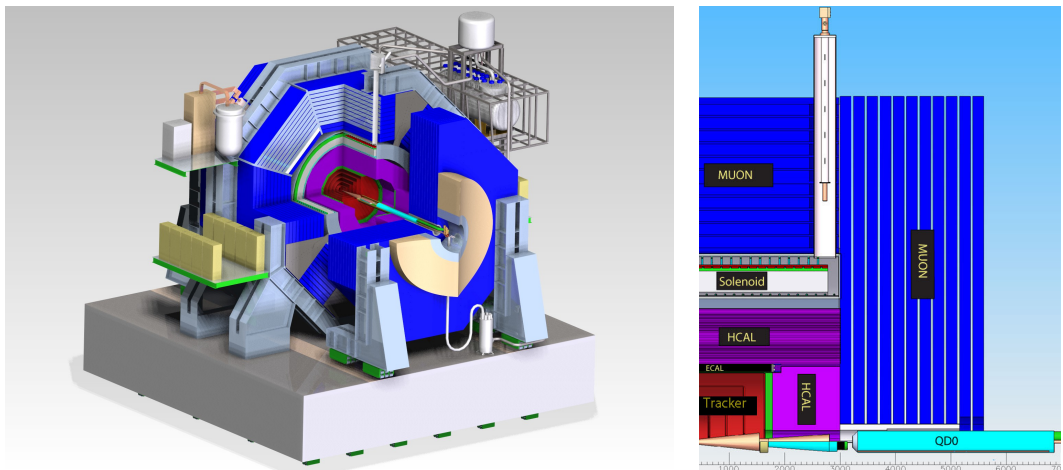


図 1.5: [1]SiD 全体図 (左) とその断面図 (右)

ILD(International Large Detector)

大きさ	高さ約 14m 長さ約 13m
磁場の強さ	3.5T
中央飛跡検出器	シリコン検出器と TPC の複合
主な開発グループ	アジア、ヨーロッパ

表 1.2: ILD の規格

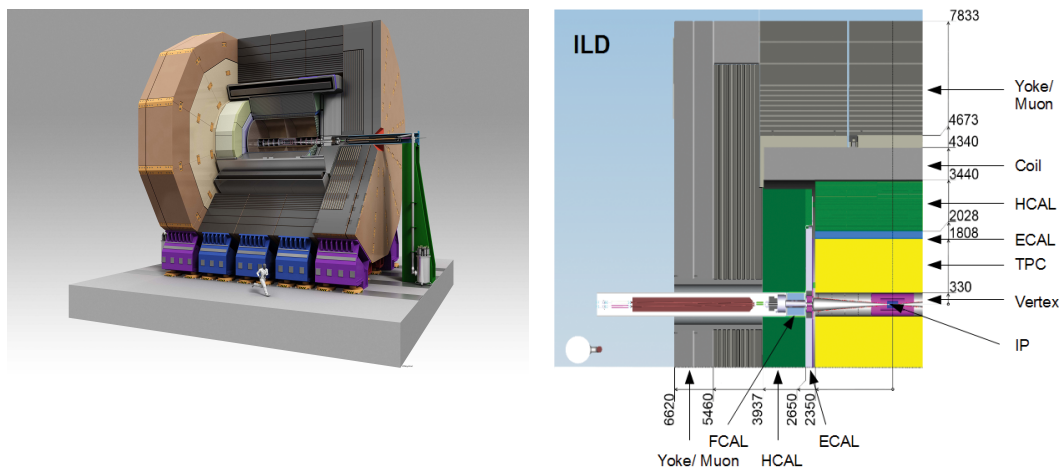


図 1.6: [1]ILD 全体図 (左) とその断面図 (右)

どちらの測定器も 200-500GeV, 1TeV のエネルギー領域をカバーするように設計されている。ILC ではこれら 2 つの測定器を、1 つの崩壊点で Push-Pull 方式を用いて交互に使用する。Push-Pull 方式では、1 つのレール上で 2 つの検出器をスライドさせることによって、ビームライン上に設置する検出器と、その外に待機する検出器の交換を行う (図 1.8)。一方がビームライン上でデータを測定している間、もう一方はガレージでメンテナンスをする事が出来る。

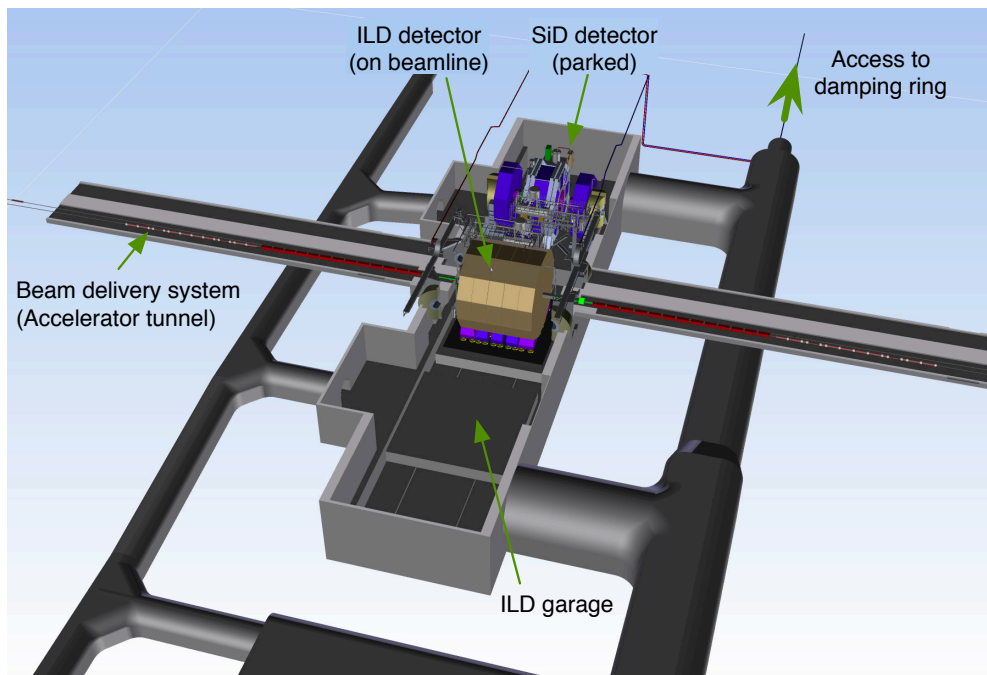


図 1.7: [1]Push-Pull 方式。SiD と ILD は 1 つのレール上に置かれ、スライドさせることでビームライン上への設置を交互に行う。

日本が開発に参加しているのは主に ILD 検出器であり、本研究テーマであるペアモニターも、ILD 検出器の前方検出器 (Forward Calorimeter : FCAL) の一部として設計されている。

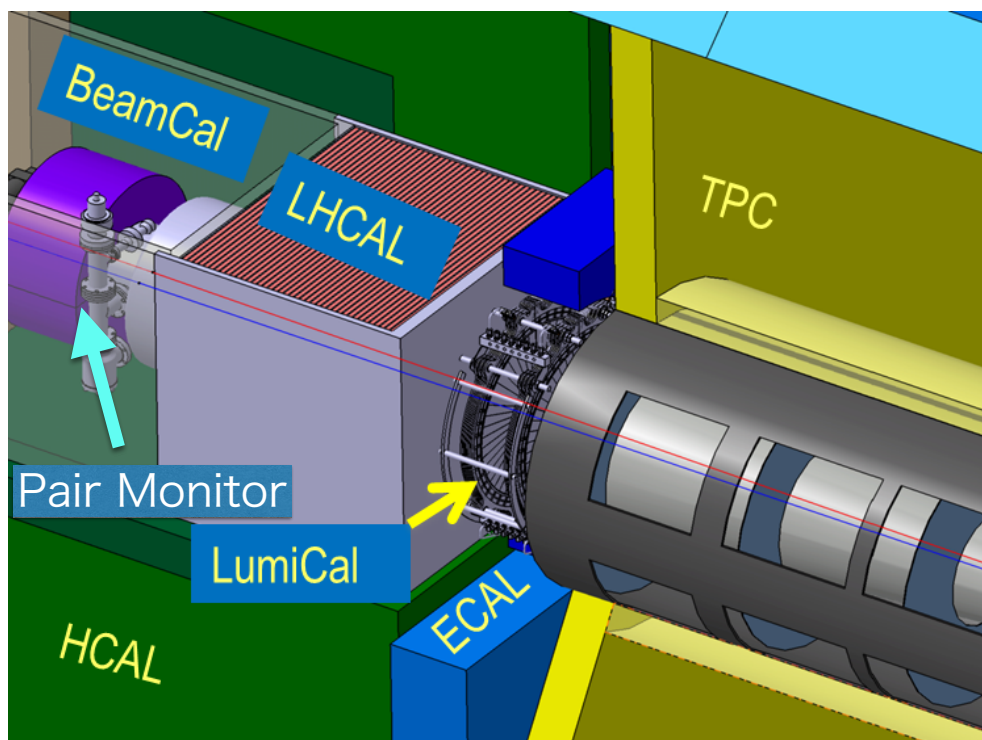


図 1.8: [1] ペアモニターはFCALの中で、BeamCalの一層目の位置にある。この位置はビーム衝突点 (IP) から約 4m の位置である。

第2章 ペアモニター

ILCではビーム衝突時に生成される主な background 粒子として、電子、陽電子ペアがある。ペアモニターはこの background 粒子をビームパイプ付近で検出する。観測量はヒット数、ヒット位置分布であり、これらの情報から衝突時のビーム形状、位置の情報を得る。本節ではこのペアモニターについて説明を行う。なお、本章やその他の章では実験で衝突させる粒子群(バンチ)のことを、ビームと呼ぶことにする。

2.1 概要

ILC 実験の成功において重要なポイントの1つは、高ルミノシティの実現による統計量の確保である。ルミノシティ L は以下のように表される [4]。

$$L = \frac{N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} f_r n_b H_D \quad (2.1)$$

N : バンチ中の粒子数

σ_x, σ_y : バンチの x,y 方向の大きさ

f_r : 1秒あたりのトレイン数

n_b : 1トレインあたりのバンチ数

H_D : ルミノシティ増大係数 (e^-, e^+ バンチ間の電磁氣的引力によるバンチサイズの収縮効果の度合い)

式 2.1 から、高いルミノシティの実現の為にはビームサイズ σ_x, σ_y を小さく絞り込む必要があるのがわかる。通常、ビームを小さく絞り込みすぎると、衝突後のビームは形状が大きく崩れてしまう。円形加速器の場合は、ビームを繰り返し加速器内を周回させ、衝突を繰り返すことでル

ミノシティを稼ぐのでビームのサイズは小さく絞りすぎない。一方線形加速器である ILC では、1 バンチは1 度しか衝突させない構造であるが故に、その1 度の衝突で高ルミノシティを実現出来るようにビームサイズを出来る限り小さく絞り込む。以下に、具体的な各高エネルギー実験で使用されているビームの大きさを示す。[5] [6] [7]

実験名	σ_x	σ_y	σ_z
ILC	474nm	5.9nm	0.3mm
HE-LHC	14.6 μ m	6.3 μ m	6.5cm
LEP	250 μ m	10 μ m	2cm
SuperKEKB	10.1 μ m	48nm	6mm

表 2.1: 高エネルギー実験のビームサイズ

表 2.1 からわかるように、ILC では前例のないほどビームを小さく絞り込むのがわかる。ILC 実験の成功の鍵を握るこのビームパラメータであるが、そのような理想的なビームを生成し、衝突させるのは容易ではない。理想的なビームを生成するためには加速器とビームプロファイルモニターが連動してビームチューニングを行う必要がある。ビームプロファイルモニターが取得すべきビーム情報は以下の2点である。

- (i) 理想的な小さなビームを生成できているか (ビーム形状の測定)
- (ii) そのような小さなビーム同士をきちんと衝突させられているか (ビームの位置のずれの測定)

これらの情報を測定し、その情報を加速器側にフィードバックし、ビームの調整を行い、またそれをモニタリングし、、、ということを繰り返してビームチューニングを行っていく。これまで加速器実験では様々なビームプロファイルモニターが用いられてきたが、ILC の挑戦的なビームサイズをプロファイルした様なものは無い。そこでビーム・ビーム相互作用によって Interaction Point(IP、ビーム衝突点) で生成される Pair background と呼ばれる電子、陽電子を利用する方法が考案された [3]。この測定方法により以下のメリットが見込まれる。

- (a) ナノメートルレベルのビームサイズ、変位情報を観測出来る。
- (b) この測定方法はビームの状態に影響を与えない非破壊型のものであり、実験を行いながらビームチューニングを行える。

- (c) 少しのバンチ衝突で十分な統計量を貯めることが出来、ビーム情報を高速に取得しフィードバック出来る。これはILCではPair backgroundが、1バンチ衝突毎に大量に生成される特徴に由来する。

2.2 測定原理

ILCでは以下のIncoherentな3過程によって、IPで大量の電子-陽電子対(Pair)が生成される。

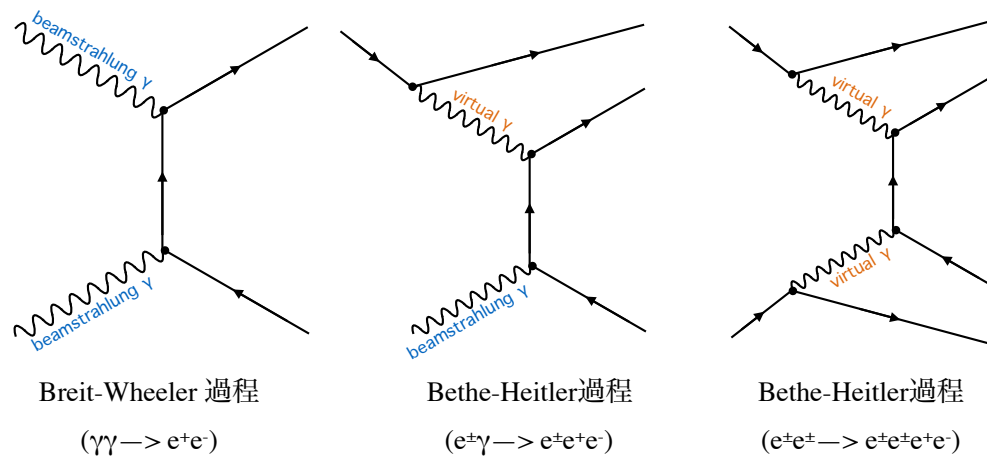


図 2.1: Pair background が生成される三過程

これらのプロセスで生成される電子、陽電子ペアは比較的低エネルギー(0~7GeV が全体の 90%を占める)であり、これらはビーム電磁場によって散乱されるが、そのほとんどはビームパイプに沿って飛んでいく。しかし一部は検出器に衝突して background 事象となる。その為これらは Pair background と呼ばれ、ILC の主な background となっている。以下では電子、陽電子ビームが持つ電磁場などを考慮し、この Pair background がビームによりどのような力を受けるかを説明する。

ビームが作る電場をビーム静止系から重心系(実験室系)にローレンツ変換すると、ビーム進行方向ではローレンツ収縮によってその電場成分は減少する為、ビームの作る電場は進行方向に垂直な2次元のクーロンポテンシャルによって近似する事が出来る。ビーム静止系での電場の垂直成分を E'_\perp とおくと、実験室系での電場と磁場の、進行方向に対して垂直な成分 E_\perp, B_\perp は、

$$\mathbf{E}_\perp = \gamma \mathbf{E}'_\perp, \quad \mathbf{B}_\perp = -\gamma \beta \mathbf{E}'_\perp \quad (2.2)$$

である。ここで、 β はビーム静止系に対する実験室系の速さである。電荷 e 、速度 β_e の Pair background 粒子がこの電磁場による受ける力 \mathbf{F} は、

$$\mathbf{F} = e(\mathbf{E}_\perp + \beta_e \times \mathbf{B}_\perp) \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $\beta = (0, 0, \beta)$ を選び、また、 $\beta_e = (0, 0, \pm\beta_e)$ という速度を持つ Pair background 粒子を考えると、力 \mathbf{F} の磁場による成分は、

$$\begin{aligned} \beta_e \times \mathbf{B}_\perp &= \beta_e \times (\beta \times \mathbf{E}_\perp) \\ &= \pm(\beta\beta_e E_x, \beta\beta_e E_y, 0) \\ &= \pm\beta\beta_e \mathbf{E}_\perp \end{aligned} \quad (2.4)$$

となる。よって、このようにビームの進行方向の速度成分のみを持つ Pair background が受ける力は、

$$\mathbf{F} = e(1 \pm \beta\beta_e) \mathbf{E}_\perp \quad (2.5)$$

として、電場のみを用いて表現する事が出来る。 $\beta \simeq \beta_e \simeq 1$ なので、同じ方向に進むビームによる電場からは力を受けず、逆方向に進むビームのみから力を受ける事がわかる。逆に言えば、Pair background はその進行方向と逆方向に進むビームのみの情報を持つ。このような Pair background 粒子が、逆方向に進むビームと同電荷であれば斥力を受け、逆電荷であれば引力を受けてビーム面付近を振動する。この粒子が受ける力はビーム電場から受けるこのような力の他に、ILC のビームパイプにほぼ平行な向きに分布している磁場からの力がある。この磁場からの力によって Pair background 粒子はビームパイプの方向に巻きつくように螺旋運動をし、IP から約 4m 離れた位置にある Pair にヒットする。Pair background は 1 つのバンチが衝突する毎に例えば 500GeV で約 120,000 個生成され、上記のように運動をしながらビーム軸に垂直な向きに面を持つペアモニターにヒットするが、そのヒット位置分布やヒットした総数などは、ビームサイズなどの形状、ビーム軸の中心からの位置のズレなどが影響を受けており、それらの情報を反映している。ペアモニターのヒット情報からビーム形状、位置のずれ (オフセット) を再構成出来るようにヒット情報とビーム情報の関係を知っておく必要がある。これはビームシミュレーションによって研究する。詳しいシミュレーションの説明は 3 章で行う。

2.3 運転時の測定手順と仮定

ビームチューニングの段階は大きく分けて以下の2段階に分けられる。
[9]

2.3.1 ビームサイズが大きい段階

この段階では、目標の小さいビームサイズに絞る事が目的となる。ビームサイズに依存する量として式 2.1 で示したルミノシティ L があり、この段階では加速器側でビームサイズを変更しながら、ペアモニターでビームのルミノシティを測定し、それが最大になるようにチューニングを行っていく事になる。ルミノシティとその時に起こる物理イベントレートは以下のように示される。[2]

$$R = \sigma L \quad (2.6)$$

R : 物理イベントレート

σ : 反応断面積

式 2.6 から、ビームのルミノシティが高い時、物理イベントは多く起こる。これは Pair background が対生成するイベントにも適用され、ビームルミノシティが高い時、Pair background の生成数も多くなると予想される。このような時、磁場に巻きついてビームパイプに沿って運動をし、ペアモニターにヒットする Pair background の総数も多くなる事が予想される。ペアモニターではヒット総数、ヒット位置分布を観測するが、この段階ではヒット総数が主にビームチューニングに用いられる観測量になると予想される。

2.3.2 ビームサイズが小さい段階

この段階では、ビームの位置のずれを調整し、ビーム同士をきちんと衝突させることが目的となる。ビームサイズが小さい時は、ビームが持つ電磁場が強くなり、それによって Pair background が散乱される影響が大きくなる。これにより、ビームの位置がずれている場合に散乱される方向も大きく変わり、これはペアモニターではヒット位置分布の大きな変化として観測される事予想される。また、ビーム同士の相対位置のズ

レが大きい際は、生成される Pair background の総数も少なくなることが予想される。この段階ではヒット位置分布が特にセンシティブとなり、それと同時にヒット総数の情報も用いながらビームチューニングを行っていくことになる。

2.4 現行のデザイン

2.2章で述べたように、ペアモニターはヒットした Pair background の情報から、衝突時のビーム情報を再構成するためのモニターである。ILC ではビームプロファイルモニターには10%の精度が要求されている。先行研究ではこの精度でビーム情報を再構成出来るようなペアモニターのデザインが示されている。以下に、現在のペアモニターのデザインを示す。

構造、材質	単層シリコンピクセル型
検出器設計	SOI-CMOS 型
半径	10cm
IP からの距離	約 4m
ピクセルサイズ	400 μ m \times 400 μ m
センサーの厚さ	200 μ m

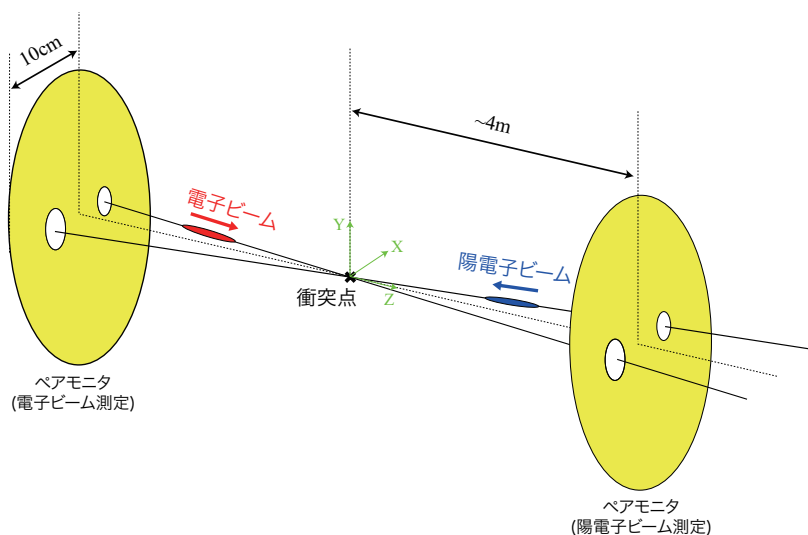


図 2.2: [7] ペアモニターの概略図

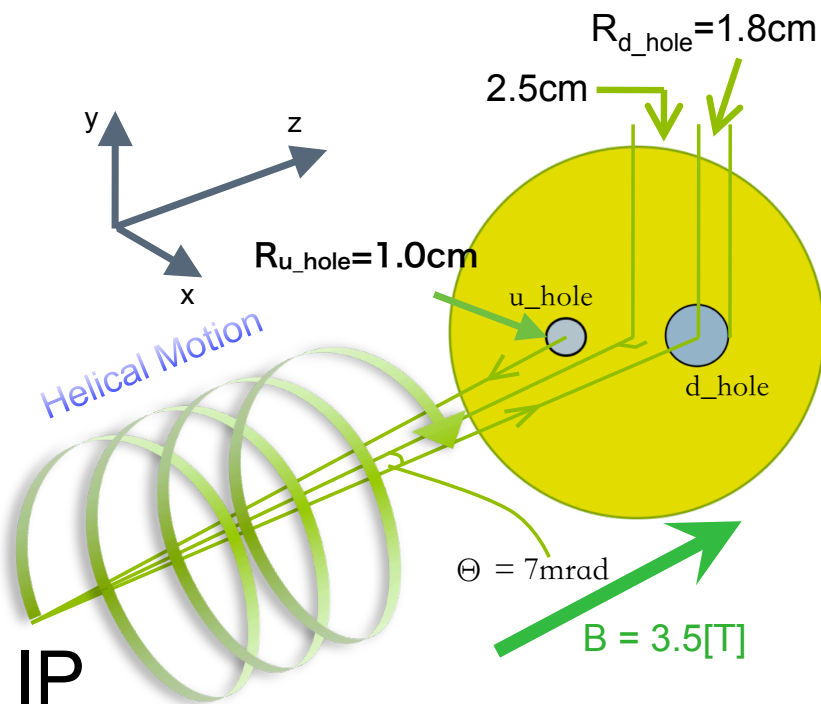


図 2.3: Pair background が螺旋運動をしてペアモニターに届く様子
 u_hole は衝突前のビームが通るビームパイプ用の穴であり、d_hole は衝突後のビームが通るビームパイプ用の穴である。

2.5 研究課題

先行研究 [7] が行われた 2010 年当時は、2007 年に発行された Reference Design Report (RDR) に記載されている ILC のデータに基づいて研究が行われていたが、現在は 2013 年に発行された Technical Design Report (TDR) においてより新しく、詳細な ILC の設計情報が規定されている。先行研究では、当時の設計環境において、シミュレーションによりペアモニターでバンチプロファイルが出来る事が確認された。本研究では当時から変更があった新しいデザインの ILC 環境においても、ペアモニターがバンチプロファイルを行う事が出来るのかどうかを確認する事が目的である。また先行研究では実際にその読み出し回路も制作され、試験が行われた。その中で課題点が幾つか見出されており、それを克服するような新しい読み出し回路の設計を行うことも本研究の目的となる。本

研究ではバンチシミュレーションと回路シミュレーションの2つの課題に取り組んだ。

第3章 ビームシミュレーション

3.1 概要

ILC の詳細な設計情報が更新された中で、ビームに関する情報も以前の先行研究の時点から変更があった。 $E_{cms} = 500 GeV$ における具体的なビーム情報の変更を以下に示す。なお、ここでは変更点のみを比較しているが、2013 年 TDR に記載されている、その他のビームパラメーターはページ 1、表 1.4 に記載したのでそれを参照されたい。

パラメーター		2007 年 RDR	2013 年 TDR	単位
ルミノシティ	L	2.0	1.8	$10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
1 train 中の bunch 数	n_b	2625	1312	
bunch の間隔	Δt_b	369	554	ns
IP RMS 水平方向ビームサイズ	σ_x^*	640	474	nm
IP RMS 垂直方向ビームサイズ	σ_y^*	5.7	5.9	nm
垂直方向エミッタンス	$\gamma\epsilon_y$	40	35	nm
IP 水平方向ベータ関数	β_x^*	20	11.0	mm
IP 垂直方向ベータ関数	β_y^*	0.4	0.48	mm

表 3.1: 先行研究時からの ILC ビームパラメーターの変化

このように新しくなった条件での電子、陽電子ビームの衝突をシミュレーションし、そこで生成される Pair background を用いてペアモニターのビームチューニングの可能性について検証した。

表 3.1 や、1 ページ 表 1.4 に記載してあるのは理想的なビームの条件である。ペアモニターの目的は、このような理想の条件を満たすビームを作るためにビームをモニタリングすることであり、生成されたビームの状態の理想からのズレを検出し、その情報を加速器の方にフィードバックすることになる。よって理想からのズレを検出できるように、あらかじめ

理想からズレたビームについてもシミュレーションしておき、ペアモニターで検出される情報としてどうそれが表れるかを研究する必要がある。本研究では、幾つかのビームパラメーターを理想値からずらし、8000 パターンの条件で生成される Pair background についてシミュレーションを行った。

以下は本研究でシミュレーションを行った条件を示した表である。

パラメータ	値の範囲	変化させた値の単位
α_x	-20 ~ +20	5
α_y	-20 ~ +20	2
δ_x	0 ~ +10	2
δ_y	0 ~ +10	1

ここで、 α_x, α_y は、ビームサイズに関わる量であり、IP での理想的なビームサイズを σ^* 、生成されたビームのサイズを σ とすると、 σ は σ^*, α を用いて、

$$\sigma_x = \sigma_x^* \times \sqrt{1 + \alpha_x^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \sigma_y^* \times \sqrt{1 + \alpha_y^2} \quad (3.2)$$

と表される。ここで、生成されたビームサイズの、理想的なビームサイズからのずれを

$$\Delta\sigma_x = \sigma_x - \sigma_x^* \quad (3.3)$$

$$\Delta\sigma_y = \sigma_y - \sigma_y^* \quad (3.4)$$

と定義しておく。また、 δ_x, δ_y はビーム位置のズレに関わる量であり、理想的な IP でのビーム位置からのずれを $\Delta\delta$ と表すと、 $\Delta\delta$ を

$$\Delta\delta_x = \sigma_x \times \delta_x \quad (3.5)$$

$$\Delta\delta_y = \sigma_y \times \delta_y \quad (3.6)$$

と定義した。先行研究ではこれらのズレ Δ の情報を、ペアモニターで観測される総ヒット数、ヒット位置分布から 10% の精度で再構成することが出来ることが示された。再構成に用いられた観測量は以下の 4 つである。

$1/N_{all}$: 総ヒット数 N_{all} の逆数

R_{max} : N_{all} の 97.5% のヒット数を含む半径

N_d/N_{all} : 領域 d を、 $0.6 \times R_{max} < R < 0.8 \times R_{max}$, $-\pi < \phi < 2.0$, $2.8 < \phi < \pi$ として定義し、このエリアのヒット数を N_{all} で割ったもの

N_U/N_D : 領域 D を、 $R < 0.8 \times R_{max}$, $-\pi < \phi < 2.0$, $2.8 < \phi < \pi$ として定義し、また領域 U を $R < 0.8 \times R_{max}$, $0.8 < \phi < 1.6$ として定義し、これらの比を取ったもの。

$1/N_{all}$ はヒット数に注目したものであり、 R_{max} , N_d/N_{all} , N_U/N_D はヒット位置分布に注目したものである。

これらの観測量がビームパラメーター ($\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\delta_y$) に依存しているとし、ビームパラメーターによる 2 次までのテイラー展開を考えると、

$$\begin{pmatrix} \omega_1 \cdot \Delta 1/N_{all} \\ \omega_2 \cdot \Delta R_{max} \\ \omega_3 \cdot \Delta N_d/N_{all} \\ \omega_4 \cdot \Delta N_U/N_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 \cdot \frac{\partial 1/N_{all}}{\partial \sigma_y} & \omega_1 \cdot \frac{\partial 1/N_{all}}{\partial \sigma_x} & \omega_1 \cdot \frac{\partial 1/N_{all}}{\partial \delta_y} \\ \omega_2 \cdot \frac{\partial R_{max}}{\partial \sigma_y} & \omega_2 \cdot \frac{\partial R_{max}}{\partial \sigma_x} & \omega_2 \cdot \frac{\partial R_{max}}{\partial \delta_y} \\ \omega_3 \cdot \frac{\partial N_d/N_{all}}{\partial \sigma_y} & \omega_3 \cdot \frac{\partial N_d/N_{all}}{\partial \sigma_x} & \omega_3 \cdot \frac{\partial N_d/N_{all}}{\partial \delta_y} \\ \omega_4 \cdot \frac{\partial N_U/N_D}{\partial \sigma_y} & \omega_4 \cdot \frac{\partial N_U/N_D}{\partial \sigma_x} & \omega_4 \cdot \frac{\partial N_U/N_D}{\partial \delta_y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_x \\ \Delta\delta_y \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$+ \begin{pmatrix} \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_x \\ \Delta\delta_y \end{pmatrix} \cdot (O(2)) \cdot \begin{pmatrix} \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_x \\ \Delta\delta_y \end{pmatrix}$$

それぞれの観測量の規格化 ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$) はそれぞれの観測変数の誤差が等しくなるようにする。ビームパラメーターベクトル ($\Delta\sigma_y, \Delta\sigma_x, \Delta\delta_y$) を $\Delta\vec{p}$ 、ビームパラメーターによる 1 次微分、2 次微分の行列 (テイラー展開の係数) をそれぞれ A_1, A_2 、観測量ベクトル ($\Delta 1/N_{all}, \Delta R_{max}, \Delta N_d/N_{all}, \Delta N_U/N_D$) を $\Delta\vec{m}$ とおくと、両辺にビームパラメーターベクトルの逆行列をかけると、

$$\Delta\vec{p} = (A_1 + \Delta\vec{p}^T \cdot A_2)^+ \cdot \Delta\vec{m} \quad (3.8)$$

と表される。ここで、”+” は非正方行列の擬似逆行列を表す記号であり、任意の $m \times n$ 行列 B に対して、 $n \times m$ 擬似逆行列 B^+ は

$$B^+ \equiv (B^T B)^{-1} B^T \quad (3.9)$$

と定義される。

手に入れたい情報である $\Delta\vec{p}$ を求めるために、先行研究では観測量の、ビームパラメーターに対する変化率である A_1, A_2 成分をシミュレーションから Fitting を行って求め、これを生かして再構成精度 10% でビームパラメーターを見積もることに成功している。

ビームパラメーターに対する、Pair background の総数や位置分布などの変化率 (A_1, A_2) 成分が類似していれば、新しいビームパラメーターでも、ペアモニターを用いてビームパラメーターを取得することが出来ると推測される。

本研究では IP で生成する Pair background のシミュレーションは行ったが、それらがペアモニターにどのようにヒットするかまではシミュレーションを行っていない。しかし、先行研究時の RDR に基づく ILC の設計と、現在の TDR に基づく ILC の設計において、ビームパイプに沿って分布している磁場の強さは変化していないため、IP で生成される Pair background の性質の、ビームパラメーターの変化への依存性が互いに似通っていればペアモニターにヒットする総数や位置分布も類似したものとなり、 A_1, A_2 は類似したものになると推測される。その際、TDR のビームパラメーターにおいてもペアモニターはビームチューニングに用いることが出来ると期待される。本研究では RDR のビームと TDR のビームをシミュレーションし、IP で生成される Pair background の性質の類似性について考察を行い、TDR でのビームチューニング可能性について考察を行った。次節以降はそのシミュレーション結果について述べる。

3.2 シミュレーションソフト

3.2.1 CAIN

CAIN は FOTRAN で記述され、Monte-Carlo 法を用いているスタンドアロン型のソフトウェアである。高エネルギーの電子、陽電子、フォトンの相互作用を組み込んでおり、電子、陽電子衝突型線形加速器の為に開発された。ビーム衝突によるビームの変形や、電子-陽電子の対生成のシミュレーションを行う事が出来る。

3.3 シミュレーション結果

3.3.1 生成される Pair background の総数の類似性について

先行研究で用いられた、ペアモニターの観測量の1つに、 $1/N_{all}$ があり、ビームパラメーター $(\Delta\sigma_y, \Delta\sigma_x, \Delta\delta_y)$ の変化に対する $1/N_{all}$ の変化率を3.1小節で述べた A_1, A_2 の一部として利用し、ビームパラメーターの再構成を行っている。本小節ではIPで生成されるPair backgroundについて、 $1/N_{all}$ のビームパラメーターの変化依存性についてのシミュレーション結果について述べる。なお、式(3.1),(3.2)で述べたようにビームサイズは α を用いて表されるので、本研究ではビームサイズパラメーターとして α を用いている。

α_x, α_y 依存性

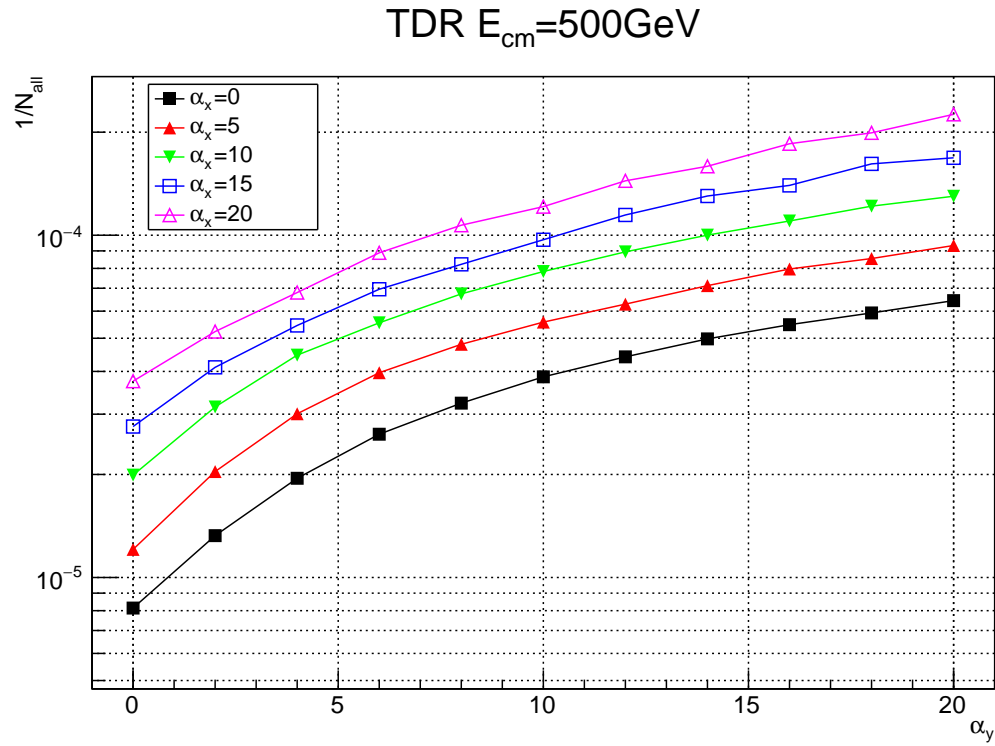


図 3.1: IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性: TDR α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 5 ずつ変えていった。
 α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。

RDR $E_{\text{cm}}=500\text{GeV}$

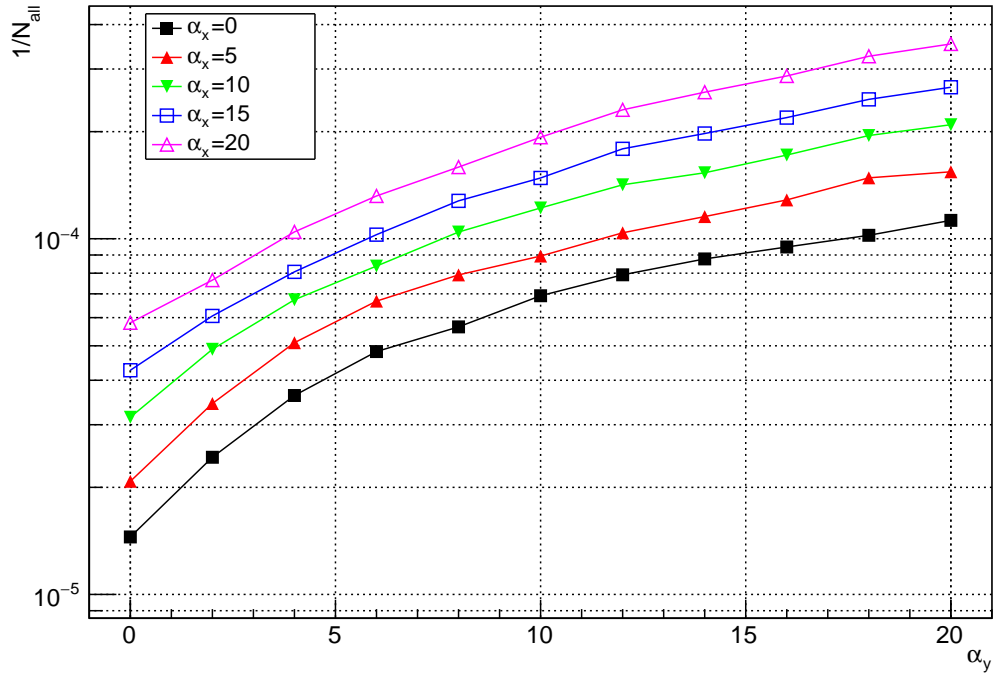


図 3.2: IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性: RDR
 α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 5 ずつ変えていった。
 α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。

RDR and TDR $E_{cm}=500\text{GeV}$

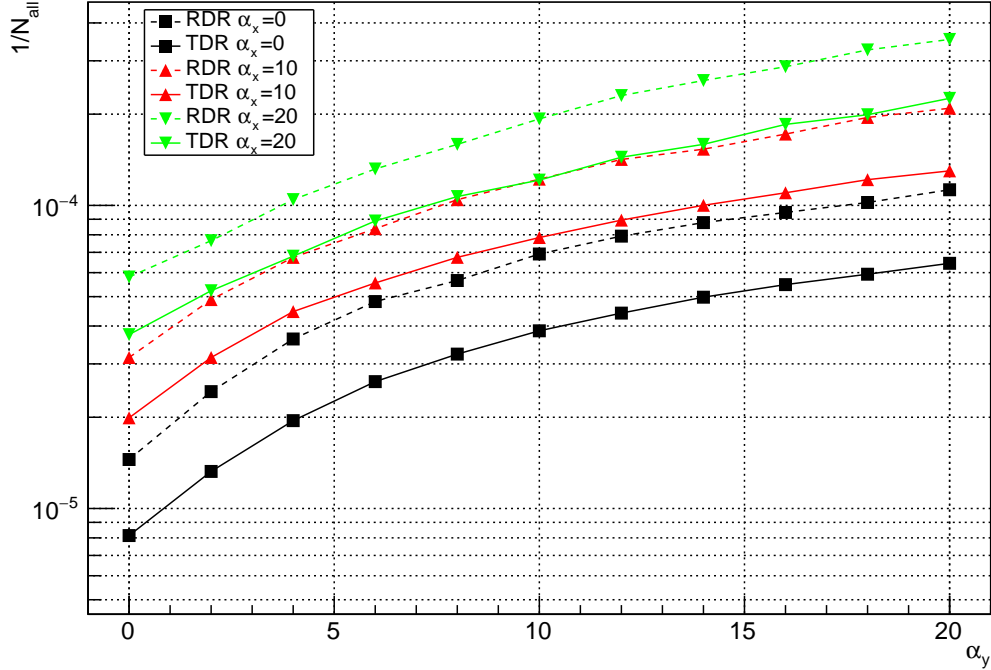


図 3.3: IP で生成される Pair background の総数の α_x, α_y 依存性 : TDR と RDR の比較

α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 10 ずつ変えていった。

α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。TDR のデータは実線で、RDR のデータは破線で示してある。

図 3.1, 図 3.2 から、TDR、RDR のどちらでも生成される Pair background は α_x, α_y が大きいときに少なくなっている ($1/N_{all}$ が大きくなっている) のがわかる。これは式 (2.1),(2.6) に由来するものである。図 3.3 は α_x の変化の幅を大きめに取って TDR と RDR の結果を 1 つにまとめたものである。図からわかるように、 α_x, α_y の変化に対する $1/N_{all}$ の変化率は互いに非常によく似たものになっている。このことから、ペアモニター上でのヒット総数の変化率の α_x, α_y 依存性も類似したものになる事が予想され、TDR でもヒット総数から α_x, α_y の情報を再構成することが可能であると期待される。

α_x, δ_y 依存性

TDR $E_{\text{cm}}=500\text{GeV}$

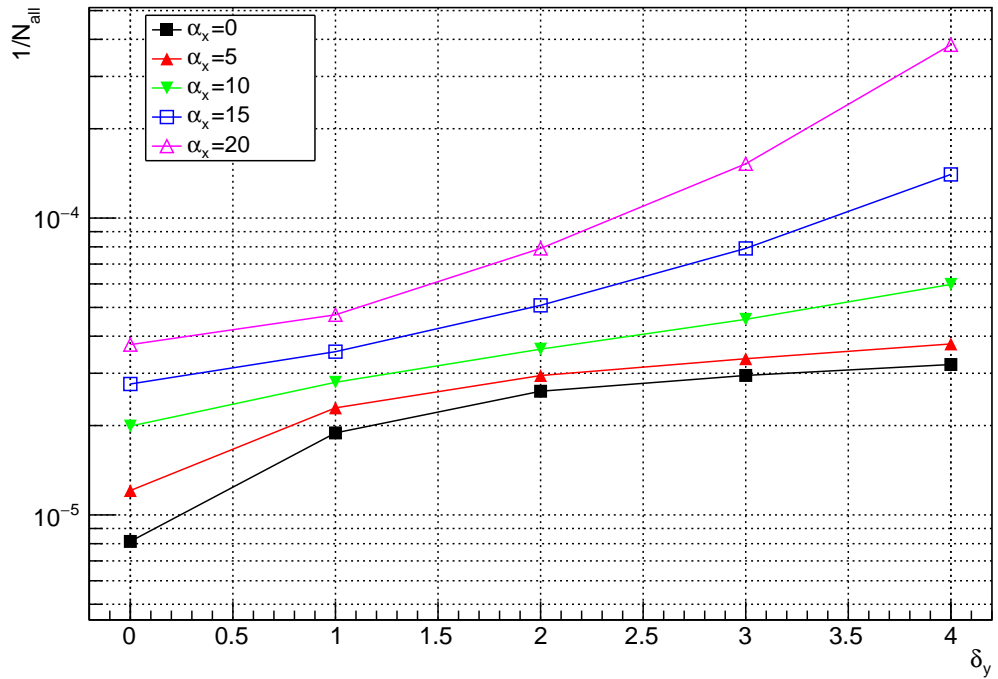


図 3.4: IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性: TDR α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 5 ずつ変えていった。
 δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。

RDR $E_{\text{cm}}=500\text{GeV}$

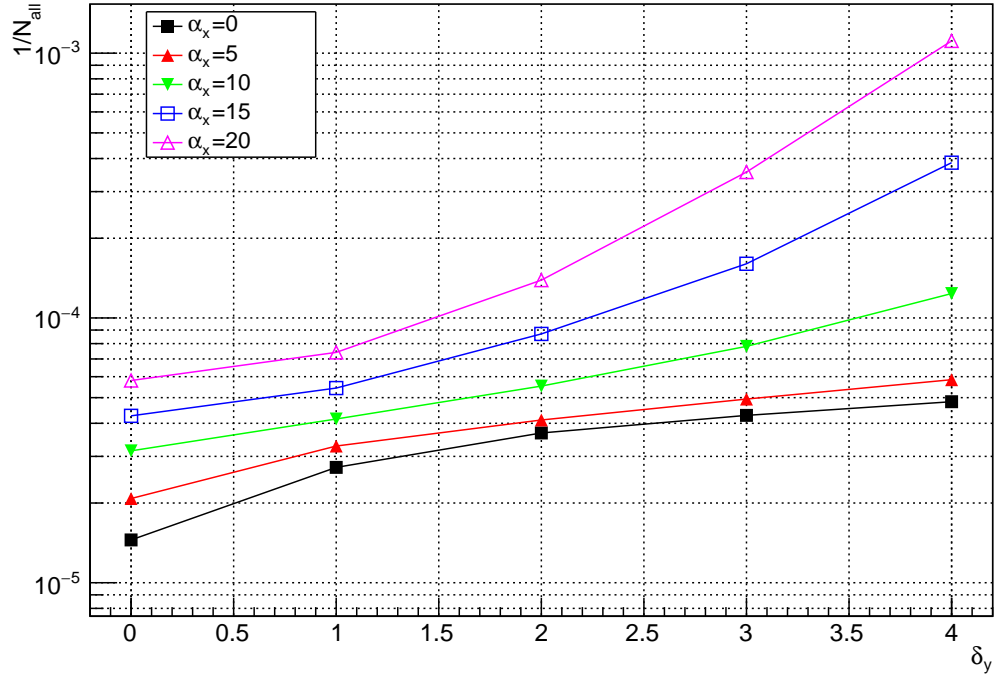


図 3.5: IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性 : RDR
 α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 5 ずつ変えていった。
 δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。

RDR and TDR $E_{cm}=500\text{GeV}$

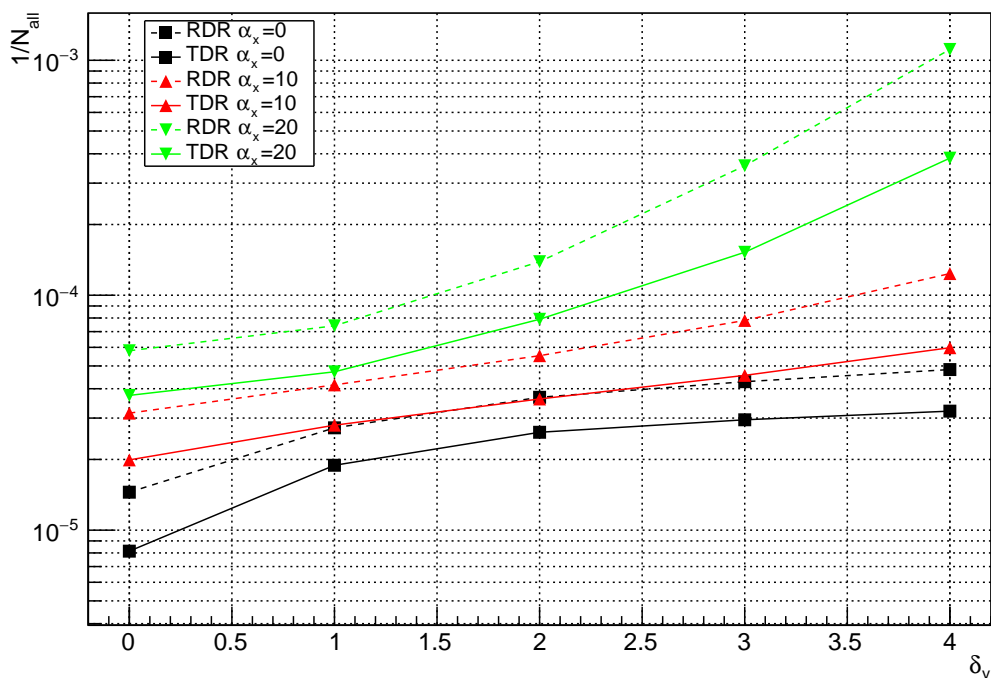


図 3.6: IP で生成される Pair background の総数の α_x, δ_y 依存性 : TDR と RDR の比較

α_x は $0 \leq \alpha_x \leq 20$ の範囲で、値を 10 ずつ変えていった。

δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。TDR のデータは実線で、RDR のデータは破線で示してある。

図 3.4, 図 3.5 から、TDR、RDR のどちらでも生成される Pair background は δ_y が大きいときに少なくなっている ($1/N_{all}$ が大きくなっている) のがわかる。しかし、この効果は α_x が小さい時は影響が少なく、あまり N_{all} が減少していない。これは、ビームサイズが小さい時はビームが作る電磁場の強度が増し、式 (2.1) で示した H_D のファクターが増大し、ビームの相対的な位置が互いにずれていても互いに反対の電荷を持つビーム同士の電磁気的な吸引力が強くなるためと考えられる。図 3.6 は α_x の変化の幅を大きめに取って TDR と RDR の結果を 1 つにまとめたものである。図からわかるように、 α_x, δ_y の変化に対する $1/N_{all}$ の変化率は互いに非常によく似たものになっている。このことから、ペアモニター上でのヒット総数の変化率の α_x, δ_y 依存性も類似したものになる事が予想され、

TDR でもヒット総数から α_x 、 δ_y の情報を再構成することが可能であると期待される。

α_y, δ_y 依存性

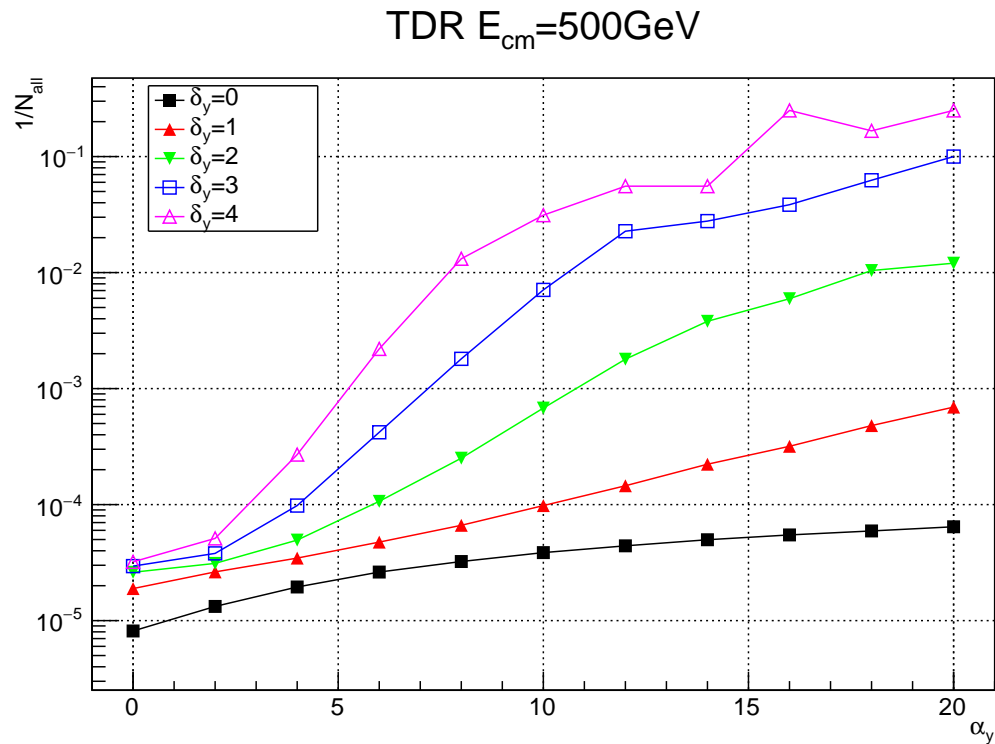


図 3.7: IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性: TDR α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。
 δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。

RDR $E_{cm}=500\text{GeV}$

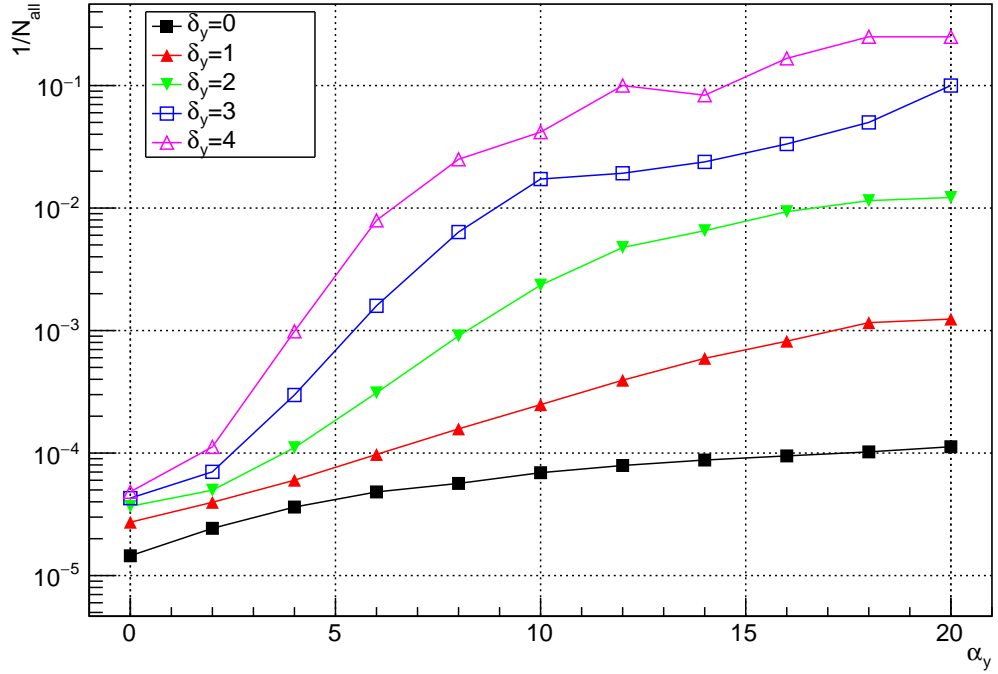


図 3.8: IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性: RDR
 α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。
 δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。

RDR and TDR $E_{cm}=500\text{GeV}$

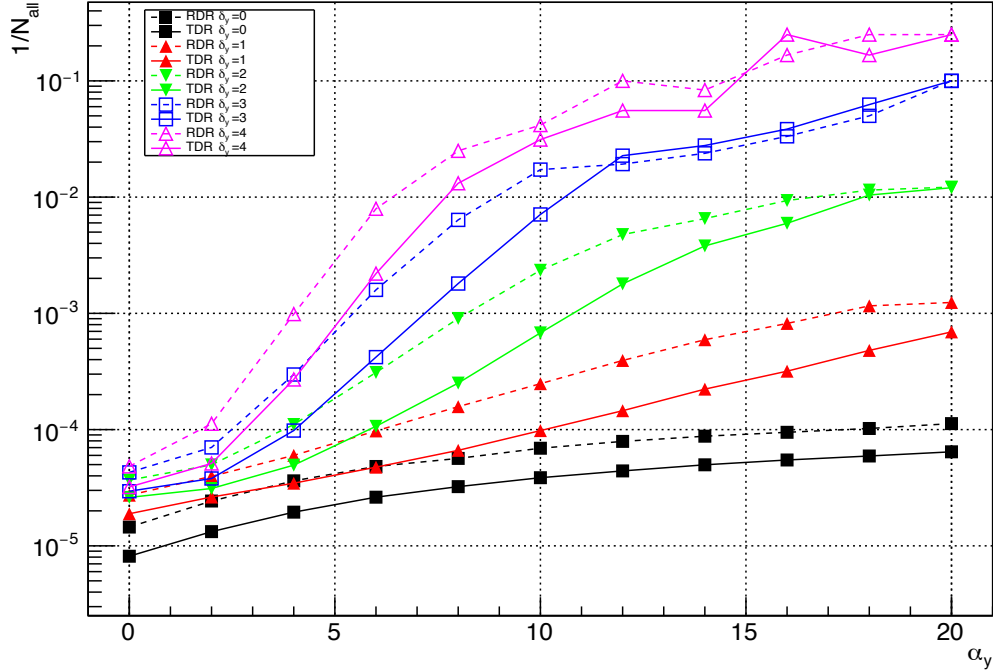


図 3.9: IP で生成される Pair background の総数の α_y, δ_y 依存性 : TDR と RDR の比較

α_y は $0 \leq \alpha_y \leq 20$ の範囲で、値を 2 ずつ変えていった。

δ_y は $0 \leq \delta_y \leq 4$ の範囲で、値を 1 ずつ変えていった。TDR のデータは実線で、RDR のデータは破線で示してある。

図 3.7, 図 3.8 から、TDR、RDR のどちらでも生成される Pair background は δ_y が大きいときに少なくなっている ($1/N_{all}$ が大きくなっている) のがわかる。しかし、この効果は α_y が小さい時は影響が少なく、あまり N_{all} が減少していない。これは、ビームサイズが小さい時はビームが作る電磁場の強度が増し、式 (2.1) で示した H_D のファクターが増大し、ビームの相対的な位置が互いにずれていても互いに反対の電荷を持つビーム同士の電磁気的な吸引力が強くなる働きが働くと考えられる。また、どちらでも $10 < \alpha_y, \delta_y = 4$ の領域ではフラつきが見られる。この領域の $1/N_{all}$ に注目すると、 N_{all} はほぼ 1 に近い値であり、生成された Pair background の総数が極端に少ない事がわかる。単に統計量が足りない為がこの原因だと考えられる。図 3.9 は TDR と RDR の結果を 1 つにまとめたものである。

る。上で説明した、統計量が少なく、フラつきが見られる領域では α_y, δ_y の変化に対する $1/N_{all}$ の変化率は互いに異なっているが、 $10^3 \leq N_{all}$ の領域では互いに非常によく似た変化をしている。このことから、統計量がある程度多くなるような α_y, δ_y の組み合わせの領域では、ペアモニター上でのヒット総数の変化率の α_y, δ_y 依存性が互いに類似したものになる事が予想され、TDR でもヒット総数から α_y, δ_y の情報を再構成することが可能であると期待される。

3.3.2 生成される Pair background の速度方向の類似性について

先行研究で用いられた、ペアモニターの観測量に、 $R_{max}, N_d/N_{all}, N_U/N_D$ などがありビームパラメーター ($\Delta\sigma_y, \Delta\sigma_x, \Delta\delta_y$) の変化に対する $R_{max}, N_d/N_{all}, N_U/N_D$ の変化率を 3.1 小節で述べた A_1, A_2 の一部として利用し、ビームパラメーターの再構成を行っている。本研究ではペアモニターでのヒット情報を用いていないので、これらに直接対応する変数はないが、これら 3 つの観測量はペアモニター上での位置分布に関するものであることに注目すると、生成された Pair background の速度角度分布が密に関係していると考えられる。本小節では IP で生成される Pair background の速度角度分布の、ビームパラメーター依存性についてのシミュレーション結果について述べる。なお、ヒストグラムの横軸は ϕ を取っているが、Pair background の x, y 方向の速さを光速 c で割った β_x, β_y を用いて

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta_y}{\beta_x}\right) \quad (3.10)$$

として定義してある。

α_x 依存性

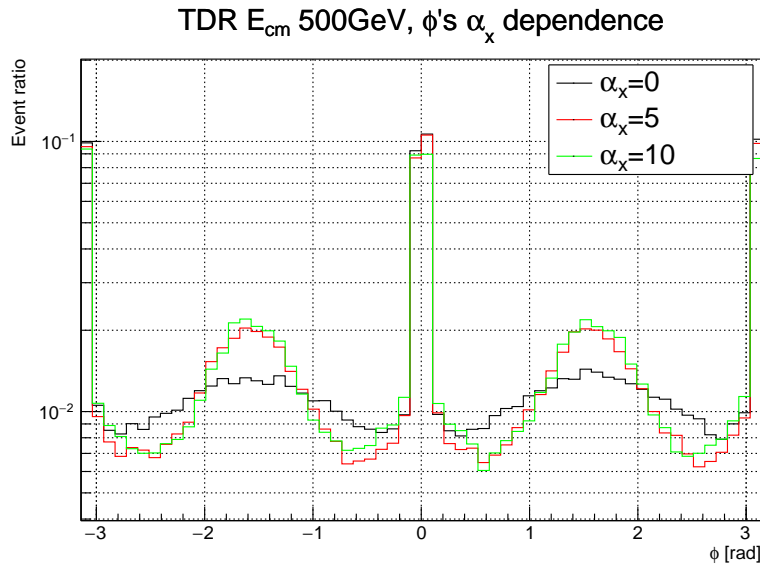


図 3.10: IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_x 依存性 : TDR

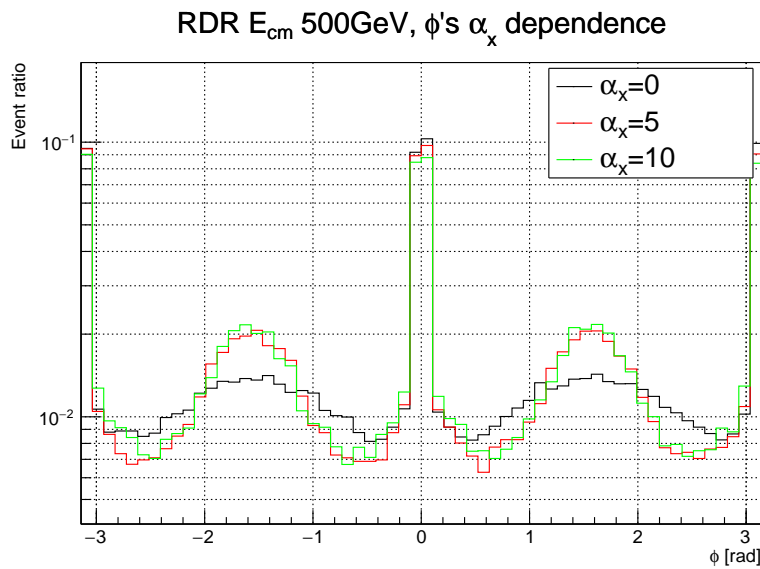


図 3.11: IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_x 依存性 : RDR

図 3.10, 図 3.11 から、どちらも α_x が大きくなると速度方向は $\pi/2, -\pi/2$ 付近に分布が多くなる。つまりビーム軸に対して鉛直 (y) 方向への分布が多くなり、水平 (x) 方向の割合は少なくなる。これはビームサイズが水平方向へ大きくなる事で水平方向の電場が弱まり、水平方向へ散乱される影響が弱まるからだと考えられる。TDR, RDR 共に、全体の形が似ているだけでなく、 α_x の変化に対する分布の変化の仕方が類似している様子が見て取れる。この事から、ペアモニター上でのヒット位置分布の変化率の α_x 依存性も類似したものになる事が予想され、TDR でもヒット位置分布から α_x の情報を得る事が可能であると期待される。

α_y 依存性

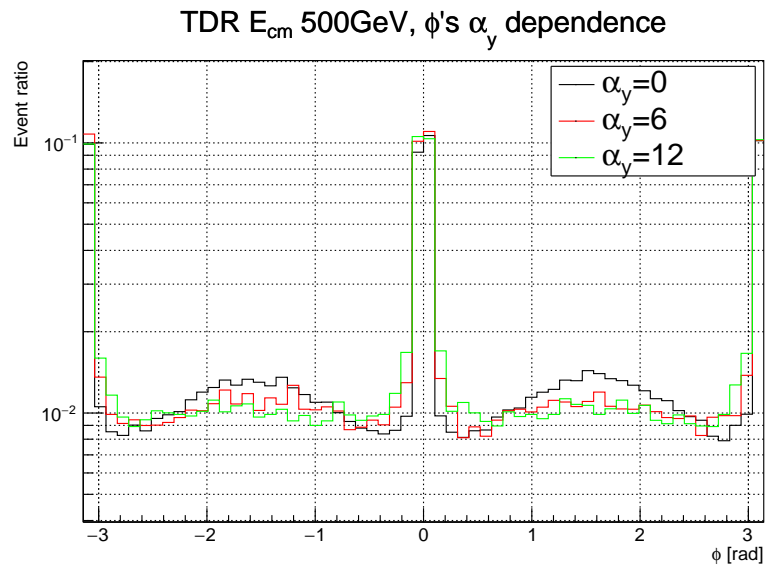


図 3.12: IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_y 依存性 : TDR

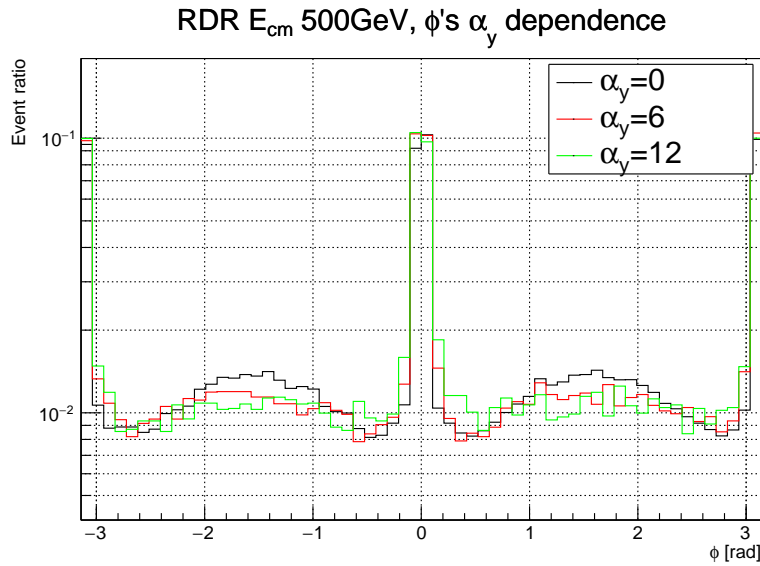


図 3.13: IP で生成される Pair background の速度角度分布の α_y 依存性 : RDR

図 3.12, 図 3.13 から、 α_y が大きくなると速度方向は $0, -\pi, \pi$ 付近にやや分布が多くなる。つまりビーム軸に対して鉛直 (y) 方向への分布が少なくなり、水平 (x) 方向の割合は多くなる。これはビームサイズが鉛直方向へ大きくなる事で鉛直方向の電場が弱まり、鉛直方向へ散乱される影響が弱まるからだと考えられる。この結果は α_x の時ときちんと逆に対応している。TDR, RDR 共に、全体の形が似ているだけでなく、 α_x の変化に対する分布の変化の仕方が類似している様子が見て取れる。しかし α_y が 6 から 12 に変化する場合は分布の変化の仕方がやや互いにバラついている様子も見取れる。これは α_y がある程度大きくなると生成される Pair background の総数も少なくなり、統計量が少なくなるためだと考えられる。この事から、統計量が多いため α_y の範囲 (本研究では $\alpha_y \leq 6$) の範囲であれば、ペアモニター上でのヒット位置分布の変化率の α_y 依存性も類似したものになる事が予想され、TDR でもヒット位置分布から α_y の情報を得る事が可能であると期待される。

δ_y 依存性

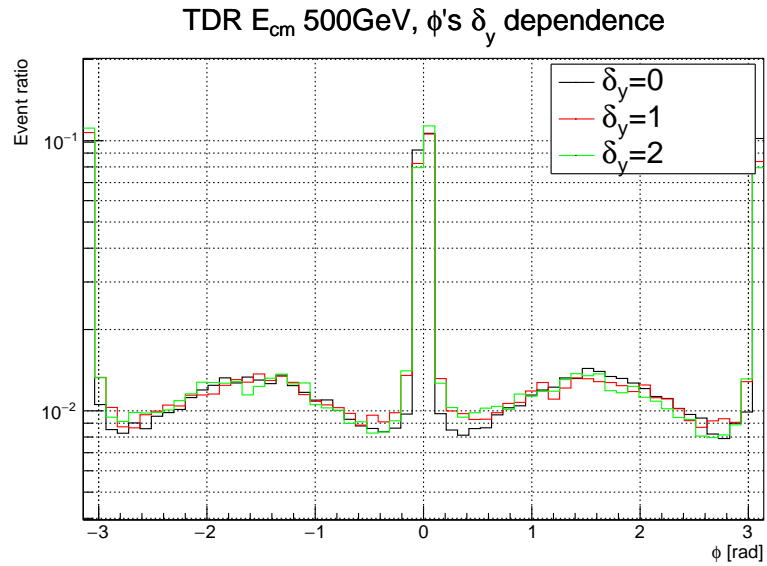


図 3.14: IP で生成される Pair background の速度角度分布の δ_y 依存性 : TDR

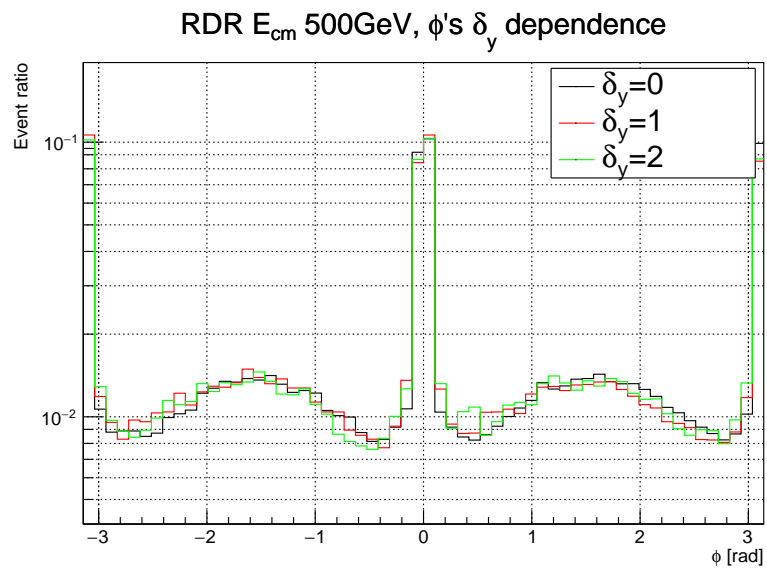


図 3.15: IP で生成される Pair background の速度角度分布の δ_y 依存性 : RDR

図 3.14, 図 3.15 では、 δ_y に対して速度方向の変化が α の時と比べてあまり見て取れない。図 3.14 の TDR の方では、 $0 \leq \phi \leq 0.6$ の範囲で、 δ_y の増加に伴い、このエリアに分布する Pair の割合が増加しているようにも見て取れる。また、 $\phi \sim 0, \phi \sim \pi$ あたりの水平方向の分布はやや増えているようにも見て取れる。しかし図 3.15 の RDR の方では TDR ほど顕著にはこのような変化は見て取れない。これらの事から、ペアモニター上でのヒット位置分布の変化率の δ_y 依存性を利用して、TDR で、RDR と同様に δ_y 情報を再構成出来るとは言えない。

3.4 まとめと今後

3.4.1 まとめ

本研究で行った、ペアモニターのビームパラメーターの再構成の可能性についての検証方法を以下にまとめる。

先行研究時の RDR に基づくビーム設計において、ペアモニターは 10% の精度でビームパラメーターの理想値からのずれ $\Delta \vec{p}$ ($\Delta \sigma_y, \Delta \sigma_x, \Delta \delta_y$) を再構成出来る事が示された。再構成には、ペアモニター上での Pair background の観測量 $\Delta \vec{m}_{PM}$ ($\Delta 1/N_{all}, \Delta R_{max}, \Delta N_d/N_{all}, \Delta N_U/N_D$) を用いており、 $\frac{\partial m_{PMi}}{\partial p_i}$ (ビームパラメーターの変化に対する観測量の変化率) を再構成パラメーターとして利用している。



現在の TDR に基づくビーム設計と RDR での $\frac{\partial m_{PMi}}{\partial p_i}$ が類似していれば TDR でも $\Delta \vec{p}$ を再構成出来ると考えられる。



TDR と RDR のビームパイプでの磁場が等しいことから、IP での Pair background の性質が類似していれば、 $\frac{\partial m_{PMi}}{\partial p_i}$ が類似すると考えられる。

本研究では、この IP での Pair background の類似性の検証を行った。IP での Pair background が持つ物理量の基準値からのずれを $\Delta \vec{m}_{IP}$ と置く。 $\Delta \vec{m}_{PM}$ で利用していた観測量を

ヒット数を利用 : $1/N_{all}$

ヒット位置分布を利用 : $R_{max}, N_d/N_{all}, N_U/N_D$

と分類出来ることに注目すると、これに対応する IP での Pair background の物理量として $\Delta\vec{m}_{IP} = (1/N_{all}, \phi_\beta)$ を定義した。そして、TDR と RDR の $\frac{\partial m_{IPi}}{\partial p_i}$ の類似性の検証を行い、TDR でのペアモニターのビーム再構成の可能性を探った。

1、ビームパラメーター変化に対する $1/N_{all}$ の変化率について

$\sigma_y, \sigma_x, \delta_y$ の変化に対して統計量が多い領域 ($10^3 \leq N_{all}$) となるような領域では RDR と TDR の $1/N_{all}$ 変化の仕方は互いによく似通っており、このことから、ペアモニター上での $1/N_{all}$ も類似する事が期待され、ヒット数情報を用いてビーム情報を再構成することは可能であると結論付けた。

2、ビームパラメーター変化に対する ϕ_β (速度方向) の変化率について

α_x については $0 \leq \alpha_x \leq 10$ の範囲で比較を行い、類似性を確かめることが出来、TDR でもヒット位置分布情報を用いて α_x を再構成出来ると期待出来ると結論付けた。

α_y については $0 \leq \alpha_y \leq 12$ の範囲で比較を行い、 $0 \leq \alpha_y \leq 6$ の範囲では類似性を確かめる事が出来た。 $6 \leq \alpha_y \leq 12$ の範囲では類似性はあまり見て取れなかったため、この範囲の α_y の再構成については RDR と同様に行えるとは言い切れないと結論付けた。

δ_y については $0 \leq \delta_y \leq 2$ の範囲で比較を行ったが、類似性はあまり見て取れなかった。この範囲での δ_y の再構成については RDR と同様に行えるとは言い切れないと結論付けた。

3.4.2 今後

本研究ではビームサイズ、位置のずれに対して 8000 パターンの組み合わせでビームシミュレーションを行い、IP 付近で生成される Pair background のデータファイルを作成した。今後は、検出器と Pair background の相互作用も含め、ペアモニターに届くまでの Pair background の運動も含めたフルシミュレーションを行う事が出来る Geant4 ソフトをベースとした

ソフトで、今回作成した Pair background データを用いて、具体的にペアモニターにどのようなヒット情報を落とすかをシミュレーションしていく必要がある。そしてそのヒット情報からビームサイズ、位置のずれの情報を再構成する方法を、RDR との比較ではなく、フィットなどの方法を用いて研究していくことになる。

第4章 SOI-CMOS型読み出し回路の開発課題と構成

ペアモニターは大きく分けて、Pair background が通過した際にそれを電荷情報に変換するシリコンセンサー部と、その信号を読み取る為の、読み出し回路部により構成されている。ペアモニターはSOI-CMOS型の検出器であるが、本節ではこの構造に関する説明や、具体的なペアモニターの回路について説明を行っていく。

4.1 SOI-CMOS プロセスについて

SOI(Silicon On Insulator) 検出器は、センサーの上部に半導体読み出し回路が配置されており、それらが SiO_2 層 : BOX(Buried OXide) 層で区切られている特徴を持つ検出器である (図 4.1)。センサー層が生み出す電気信号は金属ビアにより読み出し回路層に受け渡される。

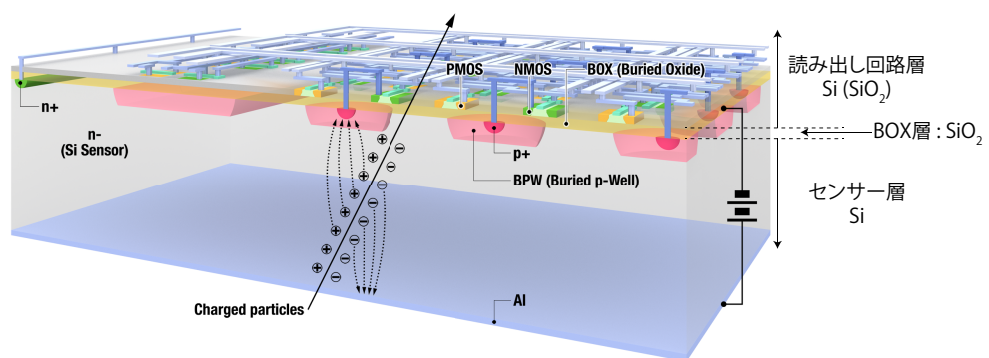


図 4.1: SOI 型検出器 [8]

ペアモニターはSOI構造であり、かつ読み出し部分でCMOSプロセス

を用いているのでSOI-CMOS型である。SOI-CMOSが持つ特徴の1つに放射線耐性があり、ILCの高い放射線環境ではこれは有用となる。

4.2 回路構成

この章ではPM02Aの回路の構成とその役割を紹介していく。本研究を進めていく中で回路の修正を幾つか加えたが、本節で紹介するのは修正後の回路である。具体的な修正内容の説明は次章行う。

なお、各回路の紹介で用いられている図には、2つ回路が記載されている場合があるが、一方はその回路の内部構造を表している物であり、もう一方はその回路全体をグループとしてまとめて、名前をつけてシンボル化して扱う時に用いられるように表記している物である。内部構造が書いていない、各章と同じ名前が書いて有る図の方がシンボル化された回路図である。

4.2.1 回路全体の大まかな動作

まず、本小節では4つのピクセルを備えた読み出し回路全体の図を用いて、その大まかな動作について説明を行う。読み出し回路全体は、図4.2に示してあるように、以下の流れで操作を行う。

1) 各ピクセルのセンサー部に Pair background がヒットし、そのヒット数が各ピクセル毎に保持される。

各ピクセル内部にある回路が、センサー部分からのパルスを受け取り、この処理を行う。各ピクセルは最大で255(8bit)まで数えられるカウンタを備えており、またそれを保存するための領域も各16個ずつ備えている。

2) 左上のCAP_DIGITALと呼ばれる部分から、ヒットカウントの許可、保持しているヒット数の読み出し信号等を送る。

読み出しを行うためのピクセルを選択する信号もここから送り、CAP_TOP,CAP_LEFTを介してピクセルにこの信号が届く。選択されるピクセルは1つずつであり、順番に指示を与えていく。

3) 2) で読み出しの指示を受けたピクセルは右方向へ信号を転送する。

最終的に一番右の CAP_RIGHT と呼ばれる部分に信号が到達すると、上方向にて信号が転送され、外部に信号が読み出される。

このようにして信号が各ピクセルに保持、読み出されていく。この他にも、主に下部に位置する回路からは、回路動作に必要な基準電流を流したり、動作試験を行うためのテストパルスを受け渡したり、それをモニタリングするための端子なども備えている。

本小節では全体の動作を意識した大まかな回路の説明を行ったが、各回路の詳しい説明や、信号の意味についての説明は 4.2.3 小節以降行う。

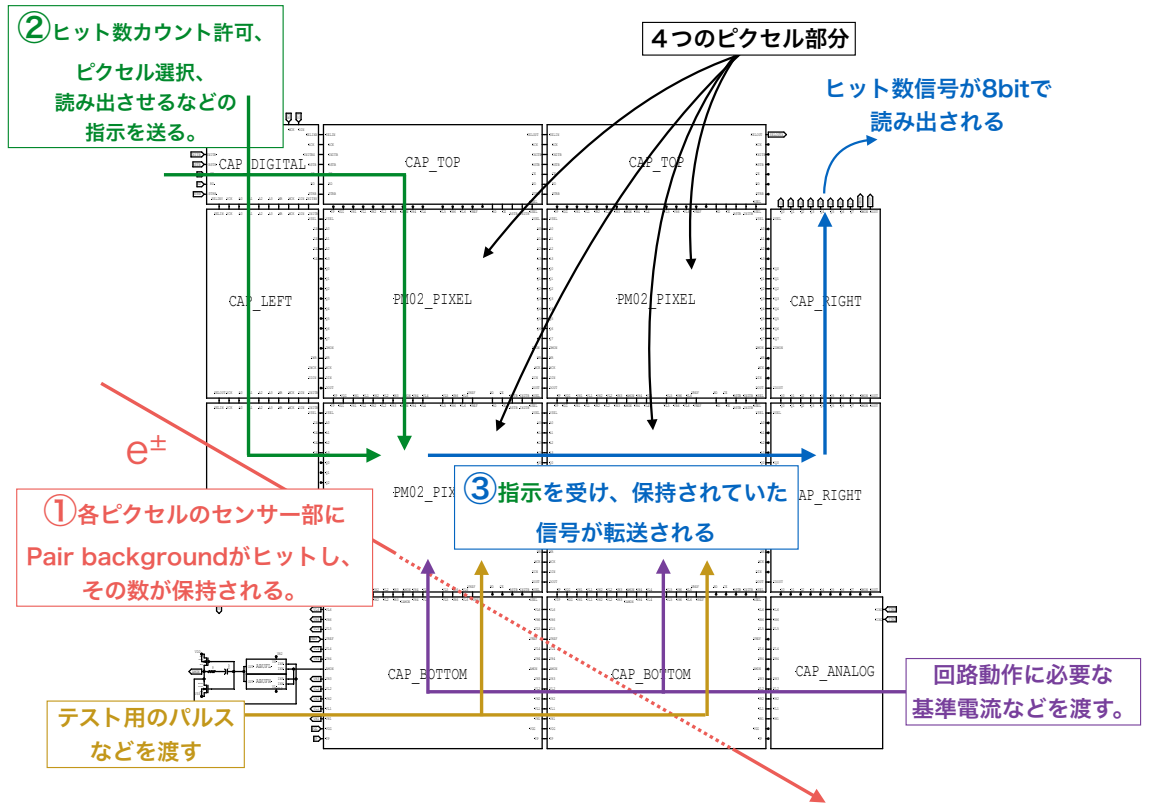


図 4.2: 回路全体の動作

4.2.2 ピクセル回路の大まかな動作

4.2.1 小節では4つのピクセルを備えた読み出し回路全体の説明を行った。本小節では、ピクセル1つ分の内部回路の大まかな説明を行う。図4.3はピクセル1つ分の内部の回路を示しているが、図に書いているように、この回路は以下の流れで動作する。

1) 各ピクセルのセンサー部に Pair background がヒットすると、パルスが届く

届いたパルスは AIN 信号として、ANALOG の左部分に入力される。

2) 届いたパルスを ANALOG が受け取り、内部で整形、増幅を行う

1) でセンサーから届いたパルスを受け取り、それを処理しやすいように整形、増幅する。

3) ANALOG が整形増幅を行った信号を、デジタル化する

下部の DAC6 が出力する電圧を INN として、ANALOG が出力するパルスを INP として COMP1 が受け取り、INP が INN の電圧を超えている間、OUT から論理的な High の電圧を出力し続け、INP が INN の電圧を下回っている間は、OUT から論理的な Low の電圧を出力し続ける。これによって、ANALOG からのパルスが来て、INN を超えている間だけ矩形波が OUT から出力される。

4) 論理的な矩形波が来るたびにその回数をカウントしていき、その情報を保持する

この処理が行われるのは REGBNK16 という部分だが、REGBNK16 は内部に COUNT8 という名前の 8bit カウンターを備えており、これによって最大 255 まで回数をカウントすることが出来る。このカウントは矩形波が来るたびに行われるので、このピクセルのセンサー部にヒットした Pair background の数に対応する。REGBNK16 には COUNT8 でカウントされた値を保存するための LATCH8 と呼ばれる回路も 16 個備えており、16 回分カウント情報を保持することが出来る。ちなみに、このカウ

ントは全ピクセルがそれぞれ同時に行い、保存領域の選択も全ピクセルで一斉に行われる。

5) 最大 16 回分保存しておいたヒット数情報を上流 (CAP_RIGHT) に渡す

カウント情報は 8bit なので 8 つの端子 (Q0~Q7) を用いて、上流に情報を渡す。カウントしたり、保存する LATCH の選択は全ピクセルが同時に行う事が出来たが、保存しておいた情報の読み出しはピクセル 1 つずつ行われる。どのピクセルから読み出すかという選択や、保存する LATCH の選択を変える指示信号などは、4.2.1 小節で紹介した CAP_DIGITAL から届く。

ピクセル回路はこれらの他に、LOCAL CONTROL(LCR) と呼ばれる回路も備えている。LCR は 1 1 個の出力を持っており、この 1 1 個の出力はピクセル内の様々な設定に用いられる。

本小節では信号の流れを意識した大まかなピクセル回路の説明を行ったが、各回路の詳しい説明や、信号の意味についての説明は 4.2.3 小節以降行う。

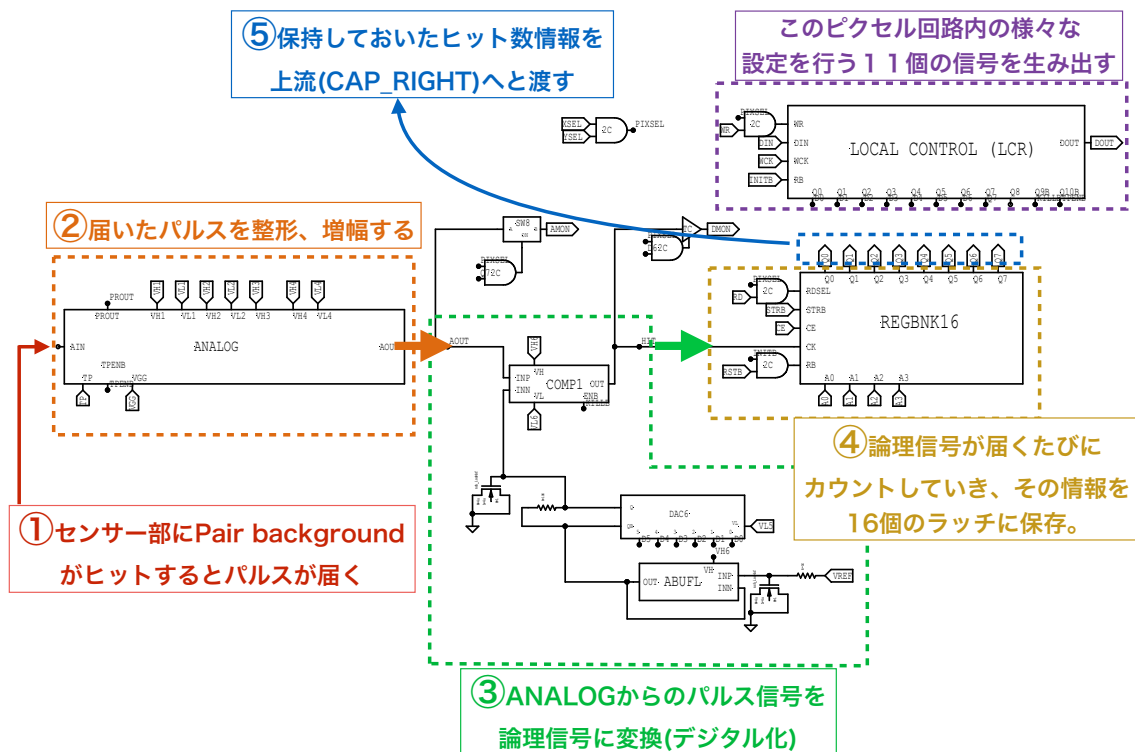


図 4.3: ピクセルの内部回路の動作

4.2.3 各信号のまとめ

各回路の具体的な説明を行う前に、この節では読み出し回路で用いられる信号の説明を行う。なお、ここで説明する信号名は最上流で扱われる信号についてであり、さらに下流の回路内では別の信号があったり、また、1つの信号を上流で使われていた信号名とは別の信号名を用いて扱っていたり、上流と同じ信号名を使っていても全く別の信号を意味する場合もある。各回路でどの信号がどれに対応するかについては注意を払って頂きたい。これらの信号名を用いた具体的な動作、回路の説明は次小節から行う。

INITB

システム全体の起動を行うための信号。INITB=Highの間システムが動作し、Lowにすると動作が停止し、状態が初期化(Flip-Flop群がReset)

される。

SELIN

ピクセル選択を許可するための信号。これが High の間のみ XCK, YCK と組み合わせて目的のピクセルを選択した状態に出来る。

XCK

ピクセル選択を、X(右) 方向に 1 つずらすための信号。

YCK

ピクセル選択を、Y(下) 方向に 1 つずらすための信号。

SELOUTX

X 方向に Pixel の選択を移動させていく中で、一番端 (右端) の Pixel が選択された際に出力される信号。

SELOUTY

Y 方向に Pixel の選択を移動させていく中で、一番端 (下端) の Pixel が選択された際に出力される信号。

RSTB

回路内にある複数の Flip-Flop の状態の初期化を行うための信号 (Reset Bar)。RSTB=High の間は通常に動作し、Low 信号を送ると Flip-Flop の状態が初期化される。

CE

下流にある COUNT4 や COUNT8 回路のカウントを許可 (Count Enable) する信号。これが High の間のみ、COUNT8 は Clock 信号 CK を受け取った際にそれをカウントする。(COUNT4 は RD 信号=High の間もカウントが許可されている。)

RD

下流にある REGBNK16 内の、記憶装置 (LATCH8)16 個の内、選択されている LATCH8 が保持している情報を上流に出力させる信号 (Read 信号)。LATCH8 を選択する為の信号を生み出す CAP_DIGITAL 内にある COUNT4 の CE 信号としても用いられ、これによって、STRB 信号と組み合わせることで LATCH8 の選択を変えていながら (COUNT4 の値を変えながら) 情報を読み取っていく事が出来る。

STRB

下流にある REGBNK16 内に 16 個ある記憶領域 (LATCH8) から 1 つを選択する信号を作る為の信号。上記の CE, RD 信号の少なくともどちらか一方が High の間、CAP_DIGITAL 内の COUNT4 は STRB を受け付ける。STRB 信号が送られる度 (信号の立ち上がりが来る度) に COUNT4 がその回数をカウントして行き、その情報が REGBNK16 にある DEC2B 回路に受け渡され、LATCH8 選択信号が作られる。STRB 信号を 1 つ打つ毎に COUNT4 が 1 つカウントを増やし、それによって選択される LATCH8 が 1 つ移動する。

WR

下流にある Local Control(LCR) が持つ、11 個の Flip-Flop の Enable 信号である。

WCK

下流にある Local Control(LCR) が持つ、11 個の Flip-Flop の Clock 信号である。

DIN

下流にある Local Control(LCR) が持つ、11 個の Flip-Flop の内、一番目に対応する Flip-Flop への入力信号である。WR が High の間、DIN が High か Low かで入力されている時に WCK が 1 つ打たれると、1 番目の Flip-Flop は WCK が打たれた時の DIN 信号を保持するようになる。ま

た、もう一度 WCK を打つとその情報は 1 つ隣の Flip-Flop へと移動し、それと同時に 1 つ目の Flip-Flop はその時に入力されていた DIN を保持することになる。このような操作の繰り返しによって 11 個の Flip-Flop に (Low,High) 情報を保持させていく。この 11 個の出力の利用については LCR の節にて説明する。

Q0~Q7

各ピクセルが記録した、Pair background の Hit 数情報を読み出した時の出力。8bit なので最大 256 個までの Hit した粒子情報が出力される。

4.2.4 TOP_PM02

回路の最上流である。全てのピクセル回路 (CORE) を統一的に操作するためのインターフェースとして機能する。この最上流からピクセル選択信号 (XCK,YCK) を送り、CORE 内部にあるピクセルの選択を行い、選択されたピクセルが保持しているデータを読み出させる信号を送ったり、各回路の基準電圧などの調整を行ったりするなど、全内部回路の操作を行うための回路である。図 4.4 では CORE4(ピクセル 4 つ分の読み出し回路) を扱うようになっているが、ピクセル数が更に増えても動作するように設計してある。

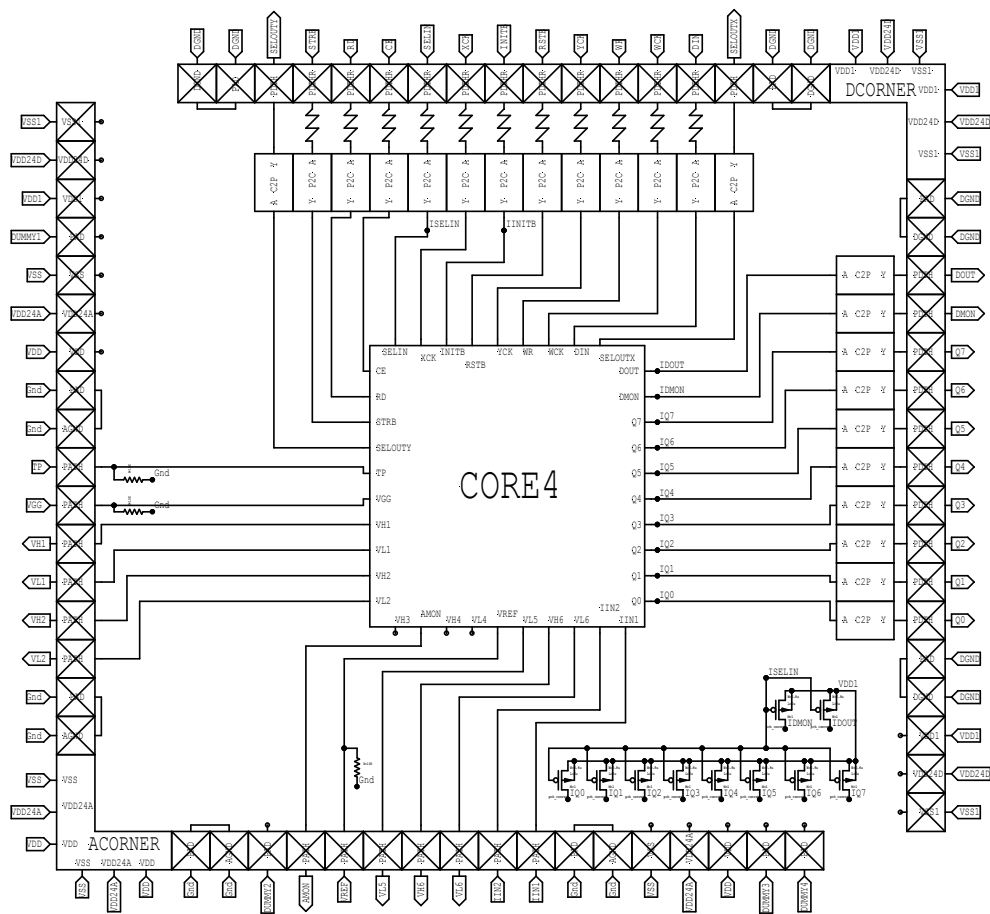


图 4.4: TOP_PM02 内部回路图

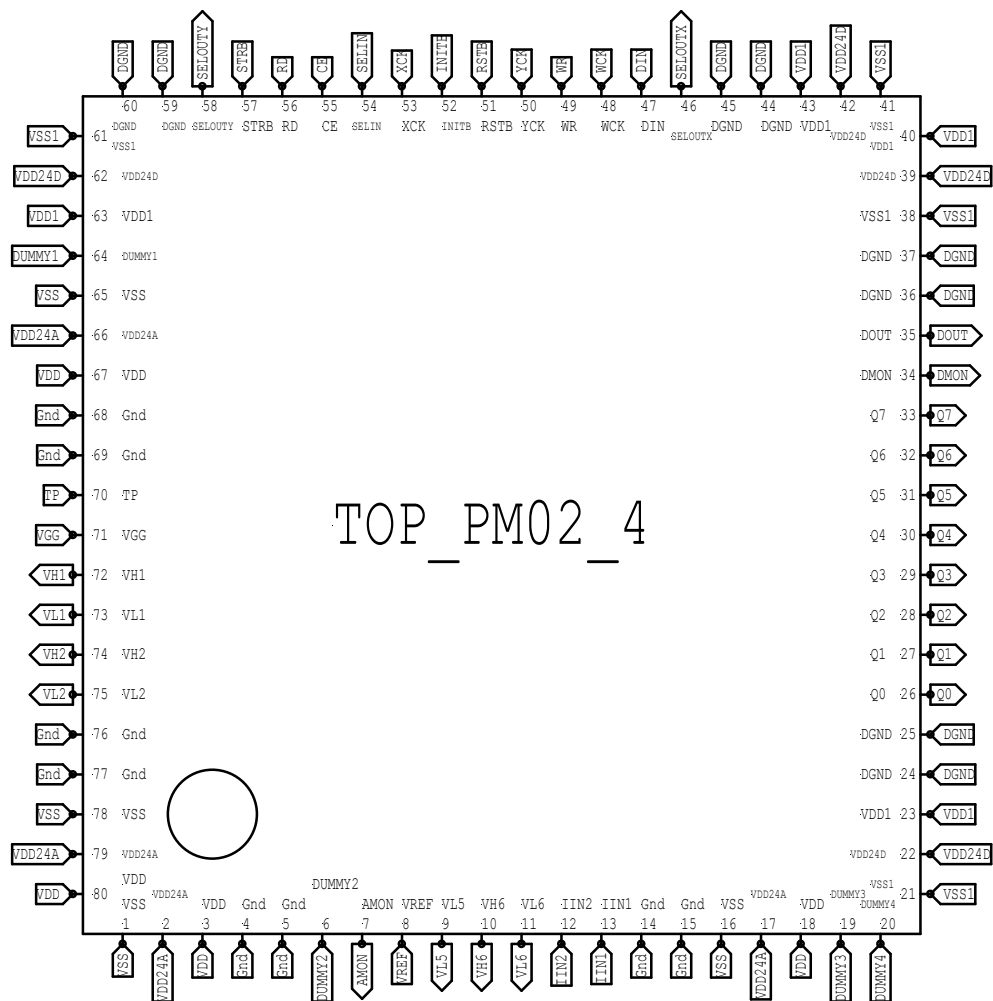


図 4.5: TOP_PM02 シンボル図

4.2.5 CORE4

CORE4はピクセル4つ分の読み出し回路である。中央に4つあるPM02_PIXELが個々のピクセル回路であり、その周りにあるCAPは周辺回路で、隣接するPM02_PIXELと信号のやり取りを行う為のものである。CORE4ではPM02_PIXELが4つしかないので、全てのPM02_PIXELがCAPと隣接しており、信号のやり取りを行うことになる。

左下にあるAMONの出力はAnalog Monitorを意味しており、PM02_PIXELからのAnalog出力をCAP_BOTTOM経由で受け取り、それを左下の回

路で整形したものである。これは各ピクセルの Analog 出力のモニタリングを行う為に用いられる。

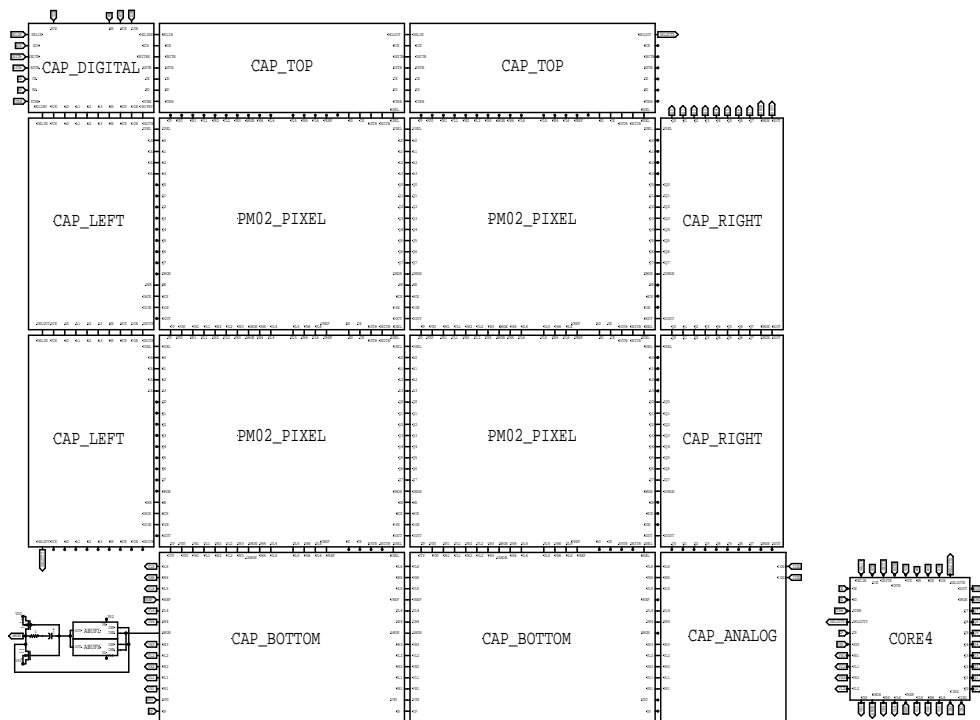


図 4.6: CORE4

4.2.6 CAP_DIGITAL

CAP_DIGITAL は回路の最上流 (TOP_PM02) から、SELIN, XCK, YCK, INITB, RSTB, CE, RD, STRB, WR, WCK, DIN 信号を受け取り、それらを CAP_TOP, CAP_LEFT に伝達する回路である。これらの信号は PM02_PIXEL まで伝達され、PM02_PIXEL 内の Digital 部分の動作を制御する為に用いられる。また CAP_DIGITAL は、STRB をクロック信号として COUNT4 に渡し、COUNT4 から binary count データ (Q0~Q3) を受け取り、CAP_LEFT へと受け渡す。この信号は更に CAP_LEFT から PM02_PIXEL 内の REGBNK16 に受け渡され、利用されていく。Q0~Q3 の組み合わせと、それがどのように利用されるかについての具体的な説明は 4.2.32 節にて行う。

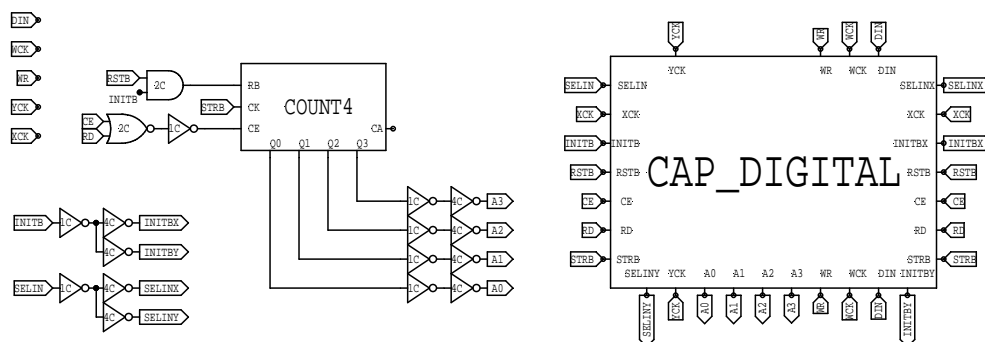


図 4.7: CAP_DIGITAL

4.2.7 COUNT4

COUNT4 は CK 信号を受け取るたびに、その回数を 2 進数的に数え上げて Q0~Q3 として出力する回路である。このカウントは CE(Count Enable) 信号が High の時のみ実行されるように、CE 信号は EDFFC の Enable 端子に入力されている。CK を受け取る度 (信号の立ち上がり時) に、(Q0, Q1, Q2, Q3) は (0, 0, 0, 0)→(1, 0, 0, 0)→(0, 1, 0, 0) (1, 1, 0, 0)→(0, 0, 1, 0)→... と出力されていく。4 端子なので、0~15 までカウントする事が出来る。この信号は PM02_PIXEL 回路内の REGBNK16 で利用される。Pair background 粒子の Hit 回数情報を記憶する記憶装置 (LATCH8) を選択する為に用いられ、記憶されている Hit 情報を取り出す際に、どの LATCH8 から取り出すか選択する際にこの信号が用いられる。よって、CAP_DIGITAL では Count する時 (CE=High)、もしくは Read する時 (RD=High) に COUNT4 の値が変えられるように、この 2 つの信号の OR(NOR の反転) を COUNT4 の CE 信号として用いている。

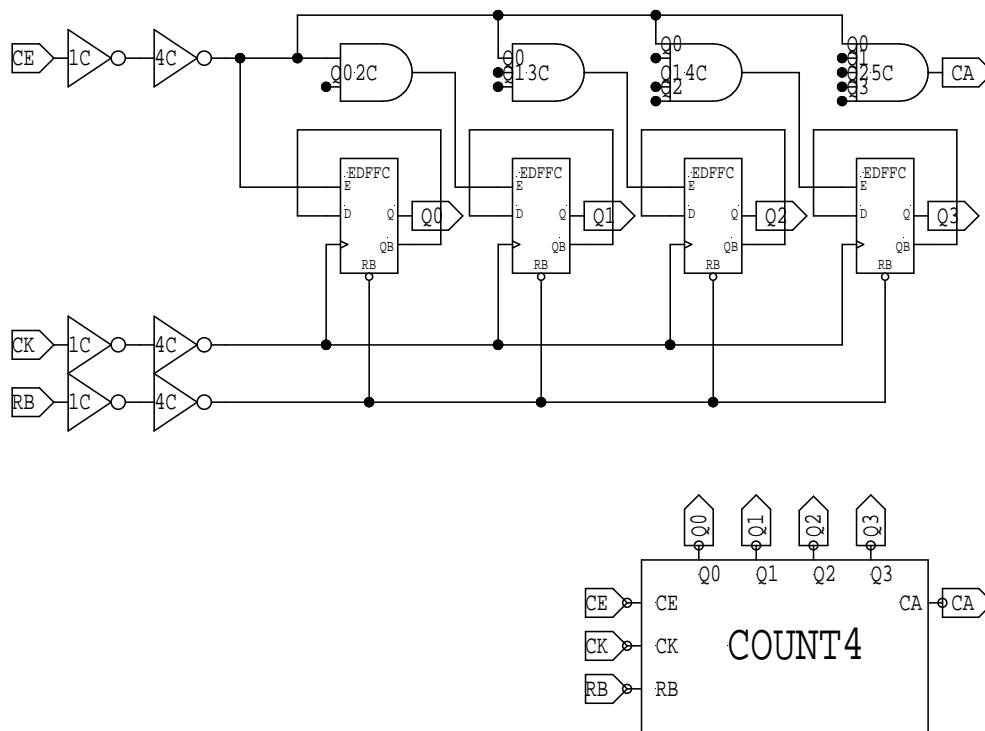


図 4.8: COUNT4

4.2.8 EDFFC

EDFFCはDFFCにEnableの機能を付け加えた物である。DFFCがQに出力する値はCKがDFFCに入力される時点でDFFCのDに入力されている電圧情報であるが、EDFFCでは出力Q自体とEの反転信号のANDを取り、それを利用する事で、EがLow(Not enableの状態)ではEDFFCに受け渡されたDの信号の状態によらず、常に前回の出力QがDFFCのDに入力される事になる。これによってE信号がLowの時はCK信号が来ても常に前回の出力を維持し続ける事になる。COUNT4の例で言うと、Enable信号(CE)がHighの時はCKが入力される度にきちんとカウントしていくが、Lowの時はCKが入力されてもカウント数は最後の状態を保持し続け、変化はない。

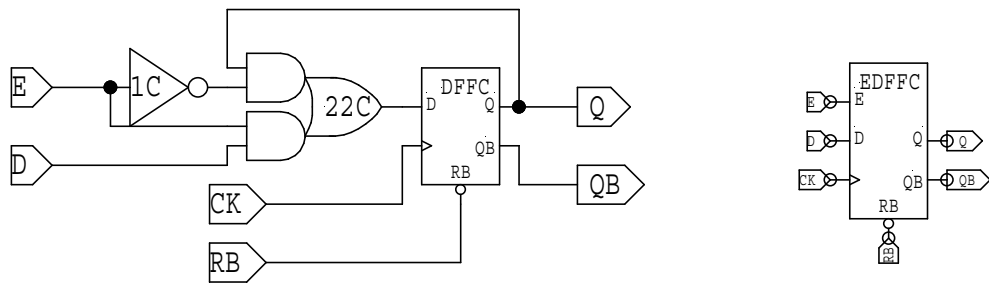


図 4.9: EDFFC

4.2.9 DFFC

DFFC は D-type の FlipFlop 回路である。CK 信号が来る度に、その時に D に入力されている High または Low の電圧情報を Q に出力させる。同時に Q と逆の電圧を \bar{Q} として出力する。RB は Reset Bar を意味しており、Low を受け取ると状態を Reset する為のものであり、 $Q=Low, \bar{Q}=High$ として初期化する。

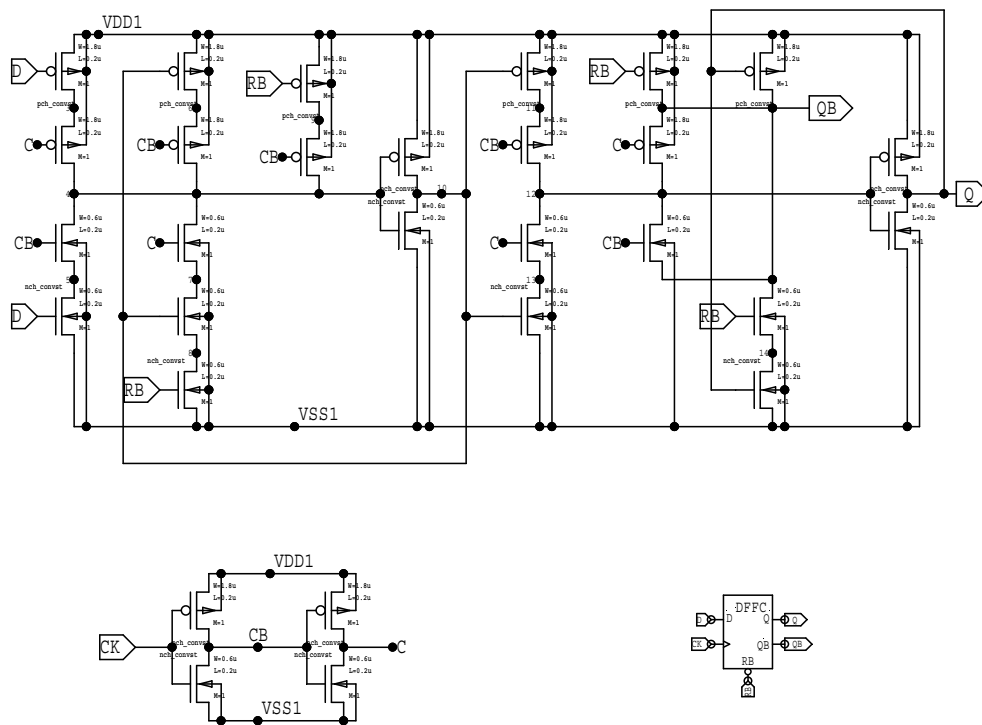


図 4.10: DFFC

4.2.10 CAP_TOP

CAP_TOP 回路には修正を加えており、本小節では修正後の回路について説明を行う。なお、修正の内容については 5.12.1 小節にて説明を行う。

CAP_TOP は左方向から受け取った信号を下に隣接する PM02_PIXEL 回路列に受け渡すのが主な役割になる。右に隣接する CAP_TOP にも信号を伝達していき、さらにその CAP_TOP も同様にその CAP_TOP の下に隣接する PM02_PIXEL 列に信号を伝達していく。これらの様々な信号は主に大きく分けて

- (a) 全ての PM02_PIXEL 回路列が受け取る信号
- (b) 特定の列の PM02_PIXEL 回路のみが受け取る信号

の 2 つに分類する事が出来る。

(a) の信号は INITB, RSTB, CE, RD, STRB 信号を 2 つのインバーターを通してドライブ能力を上げた、IINITB, IRSTB, ICE, IRD, ISTRB である。頭文字に付く「I」は Internal を意味し、周辺回路 (CAP) から内側の Pixel 回路に渡す信号という意味合いを持つ。これらは「全ての PM02_PIXEL 回路列が受け取る」=「全ての CAP_TOP がその信号を生成し、受け渡す」事が出来るように、これら (IINITB, IRSTB, ICE, IRD, ISTRB) を CAP_TOP が生成する為に必要な XCK, INIT, RSTB, CE, RD, STRB 信号は、右に隣接する CAP_TOP にそのまま伝達していき、全ての CAP_TOP が受け取り、そこから全ての PM02_PIXEL 回路列が受け取る事になる。

(b) の信号は XSEL 信号である。これは特定の PM02_PIXEL 列にのみ High の信号が渡されるようになっている。4.11 の左上の方に記載されている DFFC を用いた回路によって、SELIN, XCK から XSEL 信号と SELOUT 信号が作られる。INITB で初期化された DFFC では \bar{Q} は High が初期値であり、これを反転しているので全ての CAP_TOP が出力する SELOUT 信号は Low が初期値となる。CAP_DIGITAL から SELIN=High として一番左の CAP_TOP が信号を受け取っている状態で XCK 信号が入力されると、XSEL=High, SELOUT=High の状態になる。この SELOUT は次に状態の変化 (XCK が打たれる) 訪れるまで右隣の CAP_TOP の SELIN に High として入力され続けるが、全 CAP_TOP に伝達された XCK が打たれた時点ではこちらの CAP_TOP に SELIN 信号=High は届いていないので、こちらでは XSEL, SELOUT は Low のままである。次回 XCK が打たれた時に初めて、こちらの CAP_TOP が XSEL, SELOUT=High として出力していき、そしてまた次に XCK が打たれるとその右隣の CAP_TOP が同様の状態になって伝搬していく。これによって、複数の CAP_TOP のうち、1 つだけが XSEL=High として信号を受け取ることになる。

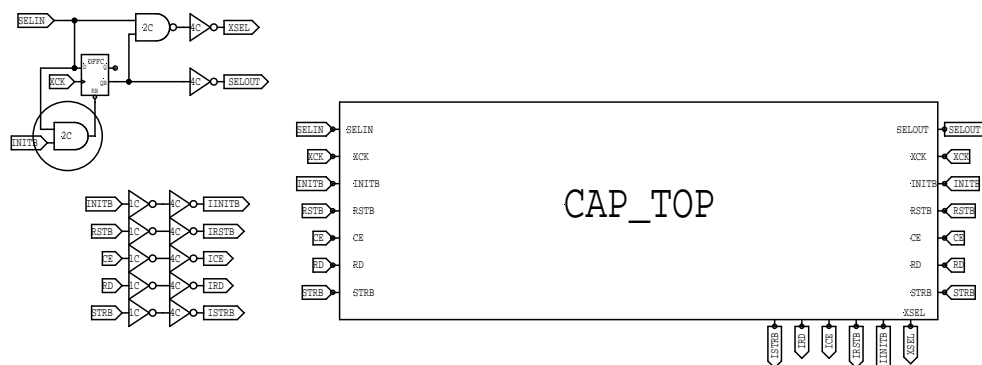


図 4.11: CAP_TOP

4.2.11 CAP_LEFT

CAP_LEFT 回路にも修正を加えており、本小節では修正後の図を示す。なお、修正の内容については 5.12.2 小節にて説明を行う。

CAP_LEFT は上方向から受け取った信号を右に隣接する PM02_PIXEL 回路行に受け渡すのが主な役割になる。下に隣接する CAP_LEFT にも信号を伝達していき、さらにその CAP_LEFT も同様にその CAP_LEFT の下に隣接する PM02_PIXEL 列に信号を伝達していく。これらの様々な信号は主に大きく分けて

- (a) 全ての PM02_PIXEL 回路行が受け取る信号
- (b) 特定の行の PM02_PIXEL 回路のみが受け取る信号

の 2 つに分類する事が出来る。

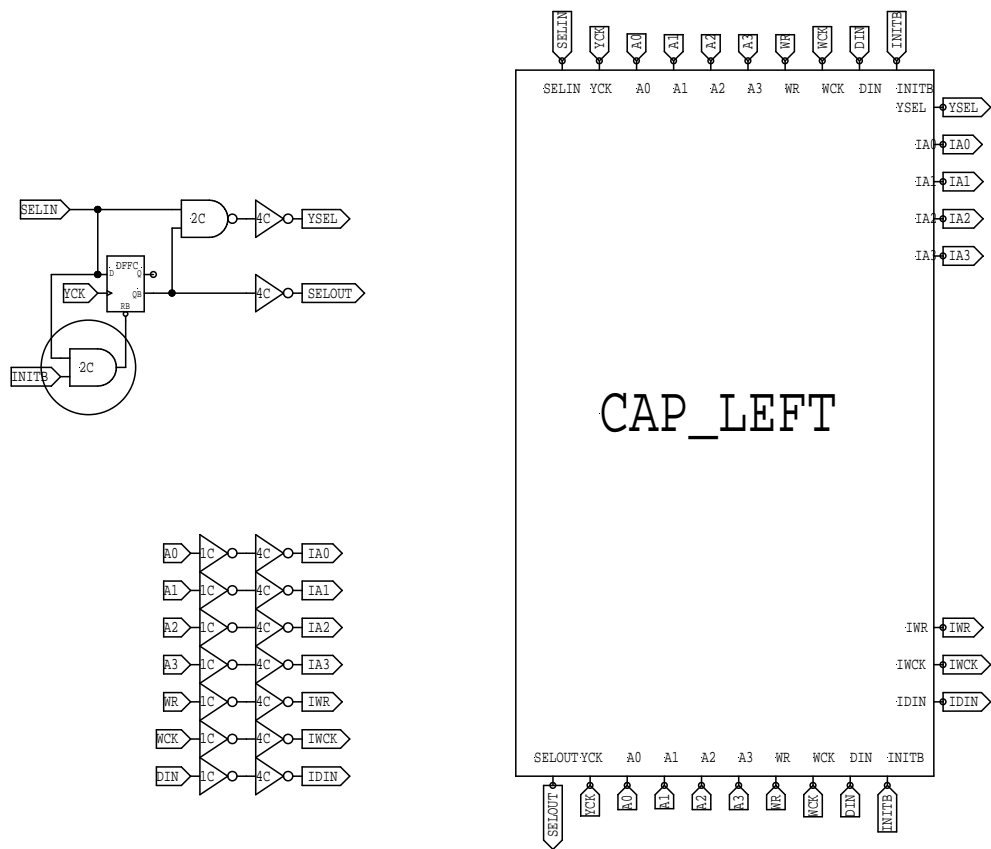


図 4.12: CAP_LEFT

4.2.12 CAP_RIGHT

CAP_RIGHT はピクセル行から Hit 数情報を 8bit として受け取り、Gray 方式から Binary 方式へと変換して上下の CAP_RIGHT を伝達させ、最終的に上流に受け渡す役割を担う周辺回路である。Gray 方式から Binary 方式への変換を Gray2Binary 回路を備え持つ。また、ピクセル回路内で各設定を行う役目の Local Control(LCR) が出力する DOUT 信号を受け取ったり、ピクセル回路内でアナログ信号をデジタル化した信号を DMON として受け取ったりし、これも上流に受け渡す機能を持つ。

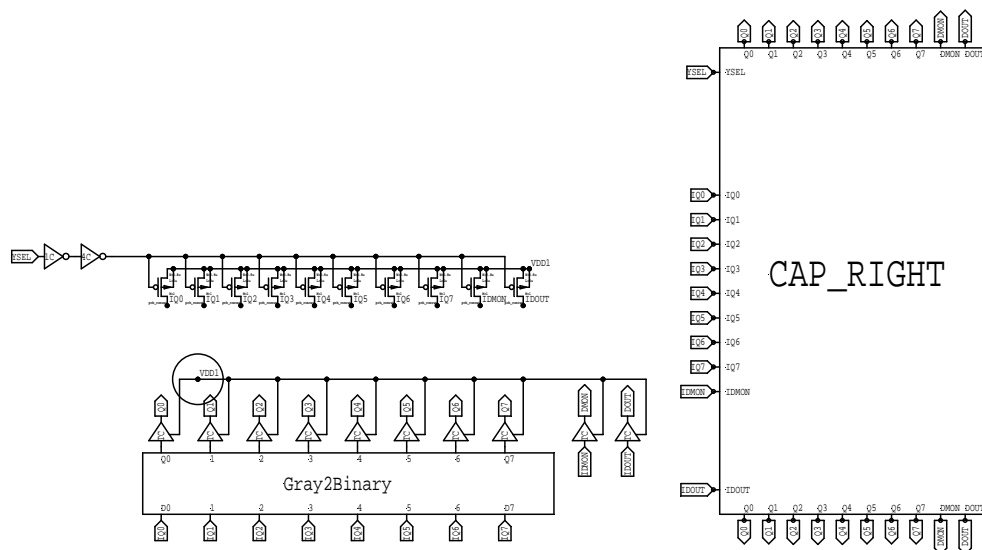


図 4.13: CAP_RIGHT

4.2.13 Gray2Binary

Gray2Binary はグレイコード (Gray Code) から 2 進数コード (Binary Code) へと変換するための回路である。

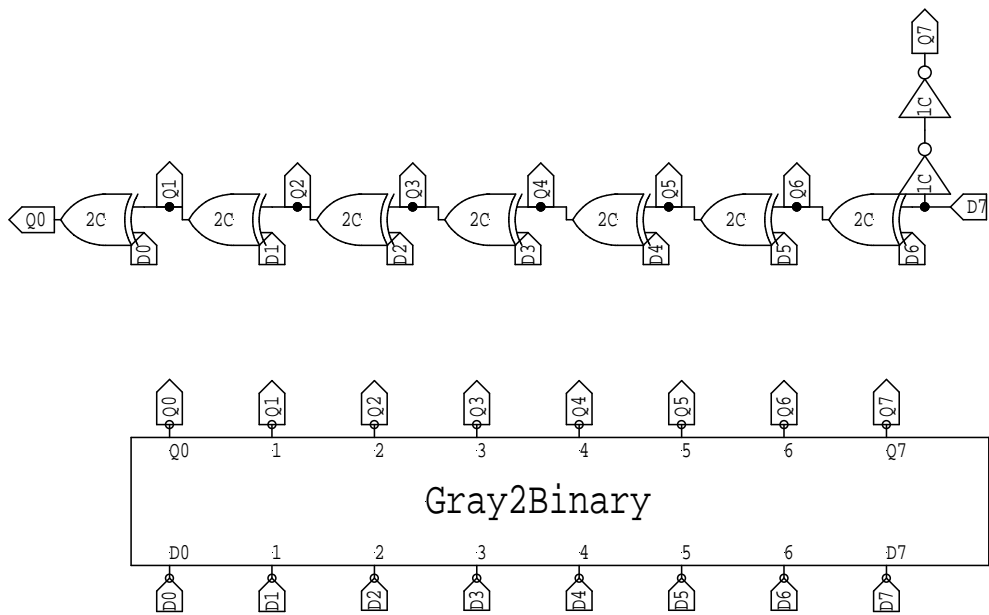


図 4.14: Gray2Binary

下流の REGBNK16 にある COUNT8 はピクセルセンサー部にヒットした粒子数を Gray Code で数え上げていく。その情報 (Q0~Q7) を受け取り、Binary Code へと変換し、コンピュータが扱いやすい形式で外部へ受け渡す為のものである。10進数と、Gray Code、Binary Code の対応を10進数で0~15の範囲で以下に示す。

10 進数	Binary Code	Gray Code
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

表 4.1: 10 進数と Binary Code, Gray Code の対応

表 4.1 を見てわかるように、Binary Code とは違い、Gray Code は 1 つ値が変わる際に変化するビットは 1 つだけである。つまり、隣り合う数値に対応する Code は互いに 1 ビットの違いしかない。Binary Code の場合はヒット情報を読み取る際、各ビットが変化している途中で読み出してしまった場合、実際の情報から大きく値がずれてしまう可能性があるが、Gray Code の場合はせいぜい 1 しか値がずれないという利点があるため、ペアモニターの COUNT8 では GrayCode を採用している。

4.2.14 CAP_BOTTOM

CAP_BOTTOM はピクセル列に対して基準電圧群を受け渡したり、テスト用のパルス (TP) を送る役目を持つ周辺回路である。また、ピクセル回路ないのアナログ部分が出力するモニター情報 (AMON) を受け取り、それを左右に伝達する役目も担っている。

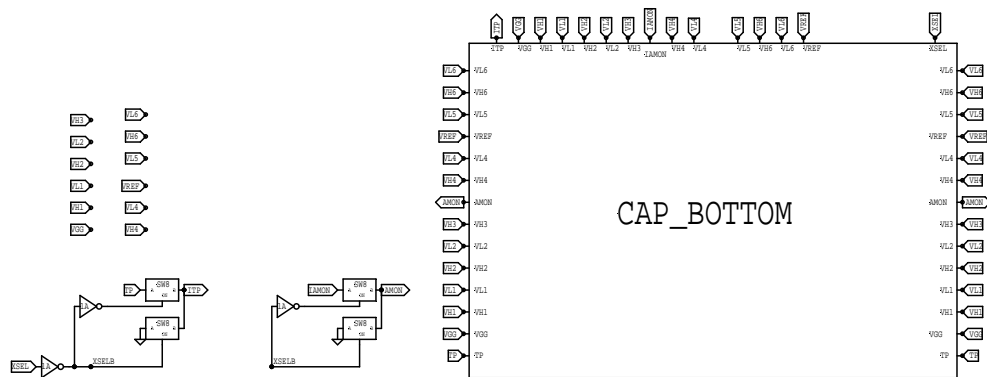


図 4.15: CAP_BOTTOM

4.2.15 CAP_ANALOG

CAP_ANALOG は主にピクセル回路に渡す基準電圧群を生成する役割を持つ周辺回路である。生成された基準電圧群はCAP_BOTTOMを介してピクセル列に渡されていく。

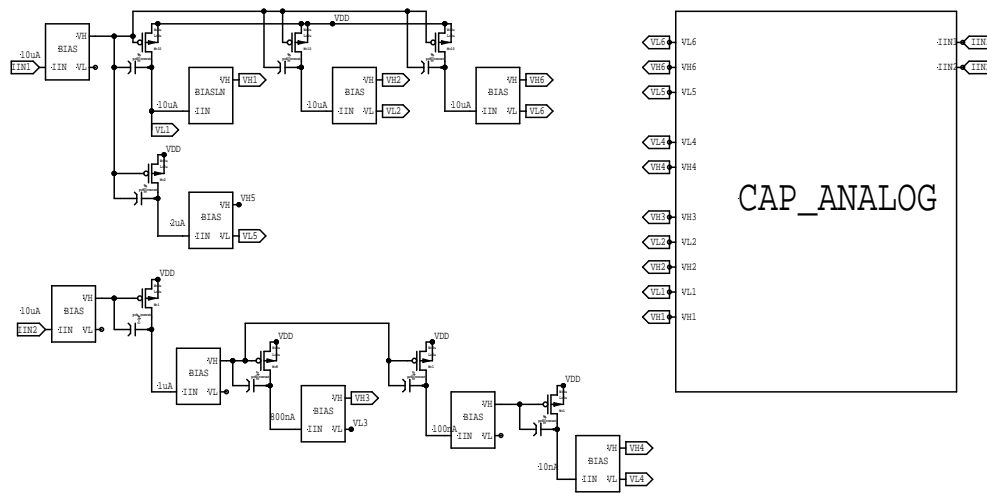


図 4.16: CAP_ANALOG

4.2.16 BIASLN

BIASLN は高電位 (VH) を生成する為の回路である。これらの電圧は基準電圧として ANALOG の前置増幅器で用いられる。

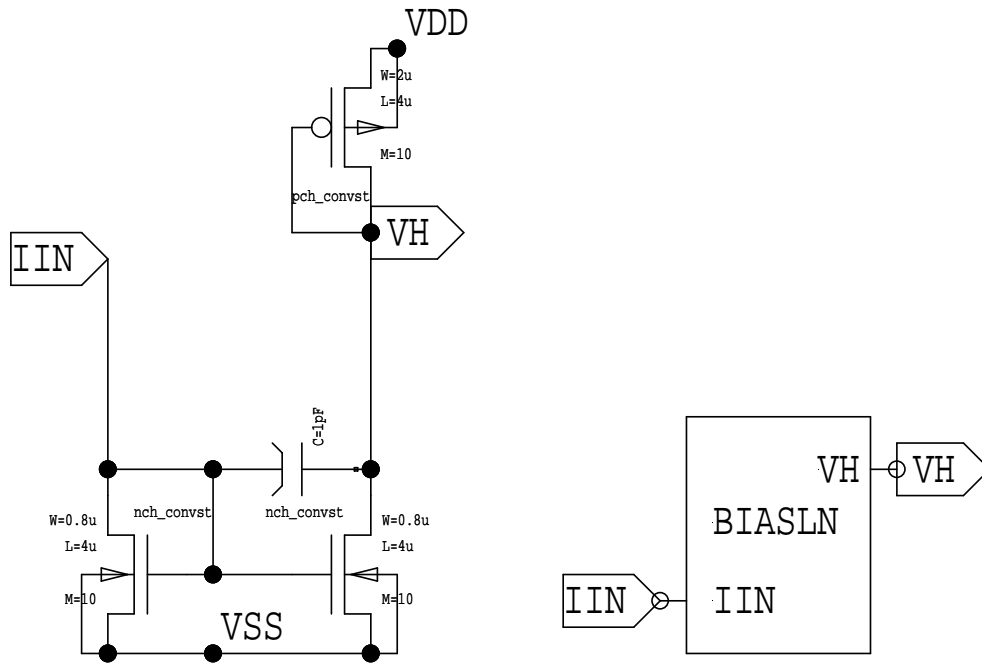


図 4.17: BIASLN

4.2.17 BIAS

BIAS は高電位 (VH) と低電位 (VL) を生成する為の回路である。これらの電圧は基準電圧として ANALOG の前置増幅器以外で用いられる。

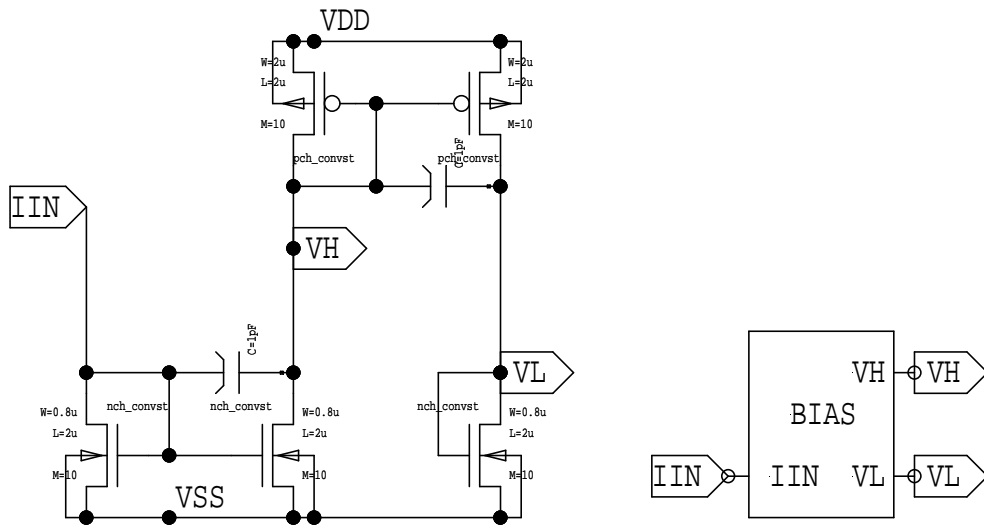


図 4.18: BIAS

4.2.18 PM02_PIXEL

PM02_PIXEL はピクセル回路部分の総称である。Pair background の Hit 情報をアナログ的に整形、増幅を行う為の ANALOG 回路、それをデジタル化するために必要な COMP1,DAC6 などを持ち、これによってデジタル化された Hit 情報をカウントし、16 回分記憶することができる REGBNK16、これらの回路の設定を行う為の電圧を受け渡す為の Local Control(LCR) を備え持つ。

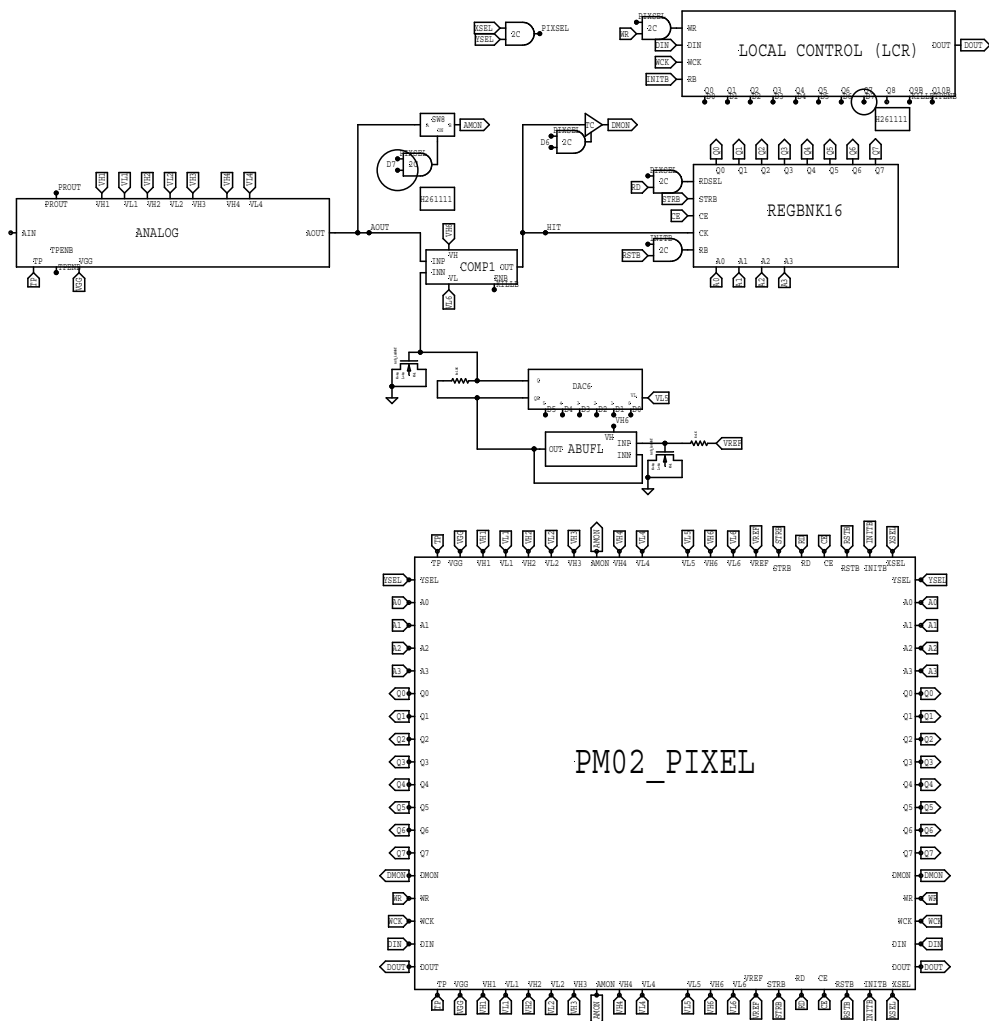


図 4.19: PM02_PIXEL

4.2.19 ANALOG

ANALOG は Pair background がセンサー部にヒットし、その電気情報を AIN として受け取り、それを整形増幅して AOUT として出力する為の回路である。

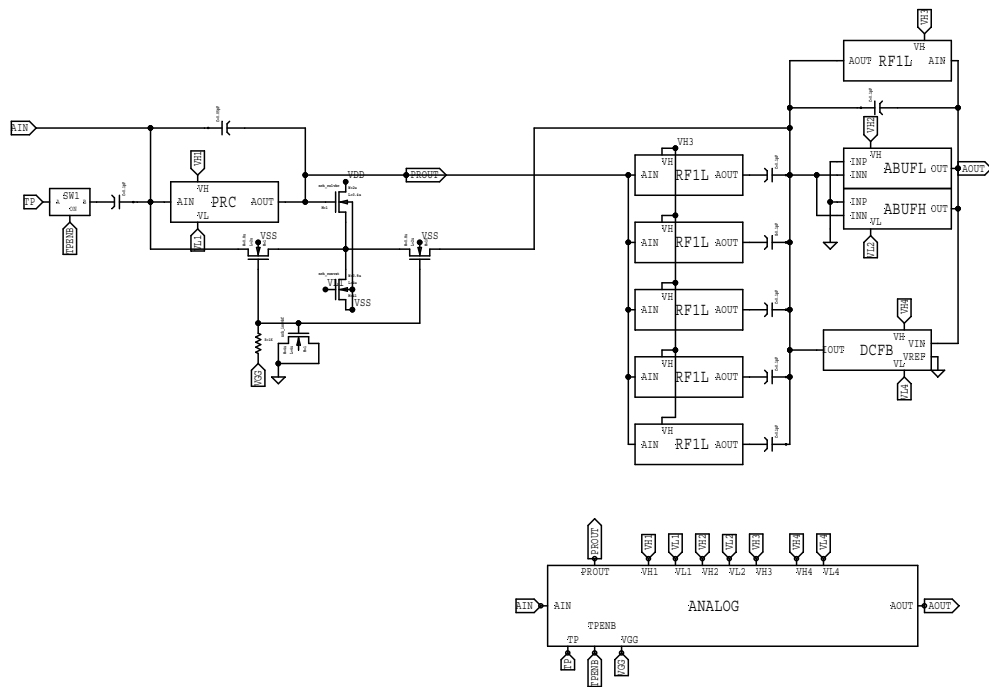


図 4.20: ANALOG

4.2.20 ABUFH

ABUFH は、unity-gain のアナログバッファである。4.2.21 小節の ABUFL に対して、直流電圧の高い側（VDD 側）にダイナミックレンジが広がっている回路になっている。

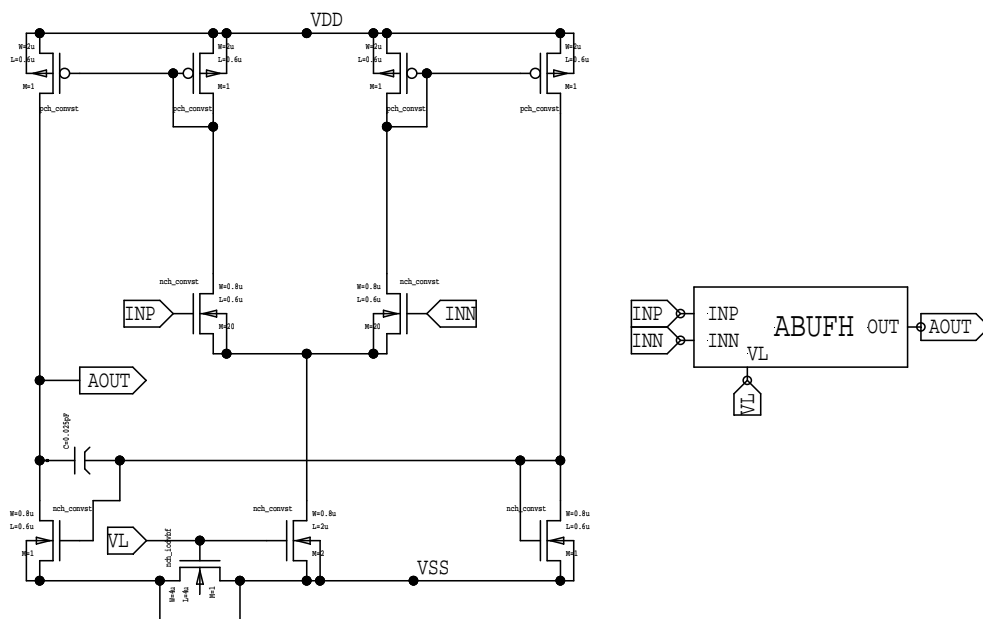


図 4.21: ABUFH

4.2.21 ABUFL

ABUFLは、unity-gainのアナログバッファである。4.2.20小節のABUFHに対して、直流電圧の低い側（VSS側）にダイナミックレンジが広がっている回路である。4.2.20小節のABUFHと本小節のABUFLの回路を並列に用いることによって、正負両側にダイナミックレンジを確保することができるようになっている。

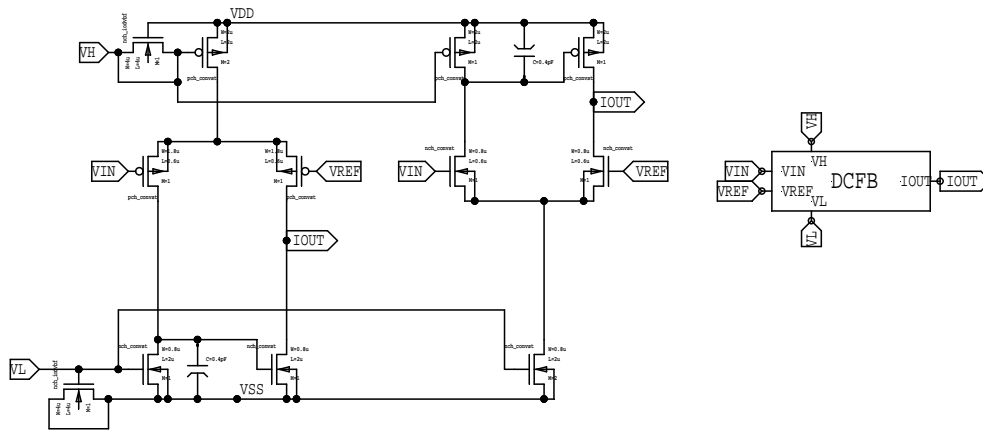


図 4.23: DCFB

4.2.23 PRC

PRC 回路は前置増幅回路の増幅要素（反転増幅）である。AIN につながっている pMOS トランジスタのトランスコンダクタンス (gm) と、AOUT につながる二つのトランジスタ (nMOS のカスコードトランジスタおよび pMOS の定電流源) のドレイン抵抗 (rd) の積 $gm * rd$ によってオープンループゲイン (帰還をかけない時のオペアンプとしてのゲイン) が定まるようになっている。 gm は、雑音性能とも関係している。検出器容量と結合して、 $i_n^2 = \omega C_d^2 (2/3) 4kT / gm$ のように入力等価雑音に寄与する。

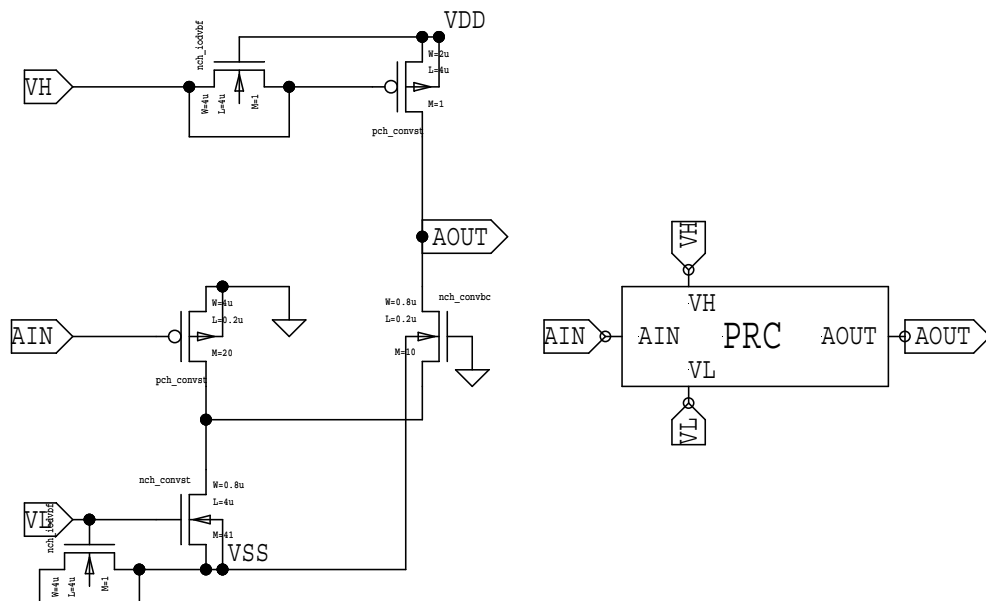


図 4.24: PRC

4.2.24 RF1L

RF1L回路は抵抗としての役割をMOSFETを用いた回路によって実現したものである。具体的には、pMOSのソースフォロワー回路の間に2個のFETを挟み込んだようになっており、挟み込まれたトランジスタのゲートは、ソースフォロワーのトランジスタとゲート電位を共通している。こうすることによって、「挟み込まれた」トランジスタは、信号が入ったときにもVGSが一定のまま、VDSの変化を受けることになるため、小信号に対しては、VDSに比例する電流を流すことができ、すなわち抵抗のように応答する。

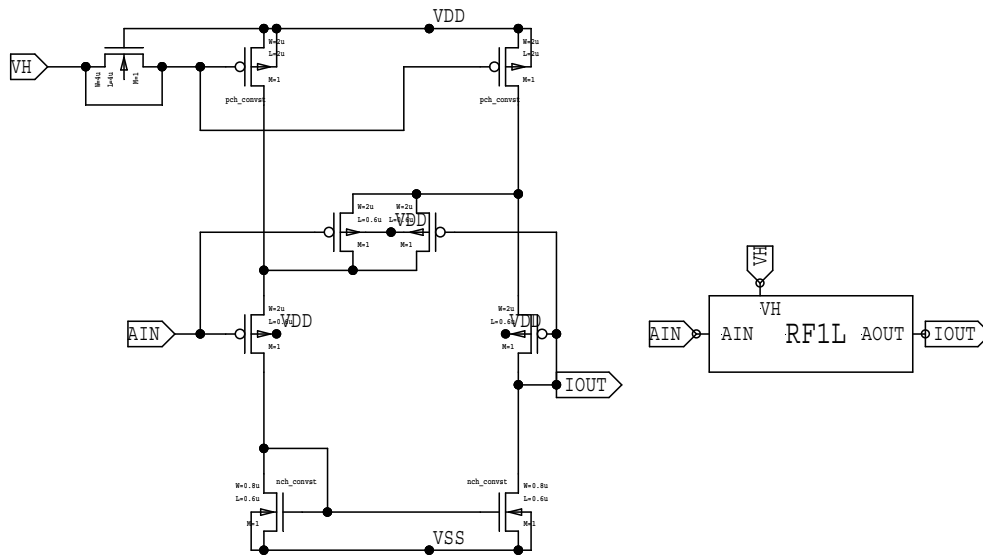


図 4.25: RF1L

4.2.25 SW1

SW1はスイッチ回路である。トランジスタを1つ用いている為、名前に「1」が付いている。ON=Highの間、入力Aを出力Bとして渡す。

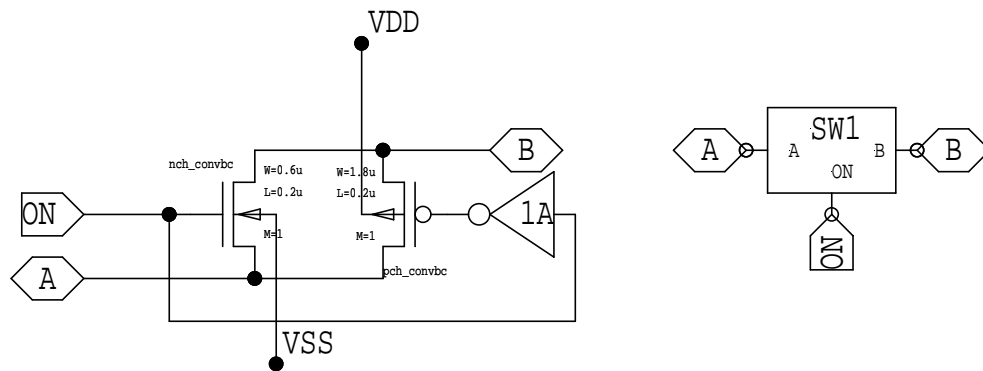


図 4.26: SW1

4.2.26 COMP1

COMP1はINNを基準に、INPの電圧が高い間、OUT=Highを出力する回路である。これはANALOGの出力(AOUT)をデジタル化するために用いられる。ピクセルセンサー部にPair backgroundがヒットし、ANALOG回路からそのパルスが届くと、IIN基準に、パルス波高がそのスレッシュホールドを超えている間、OUT=Highとして出力する。これはREGBNK16にあるCOUNT8のクロック信号として用いられ、ヒット数情報を作るために用いられる。

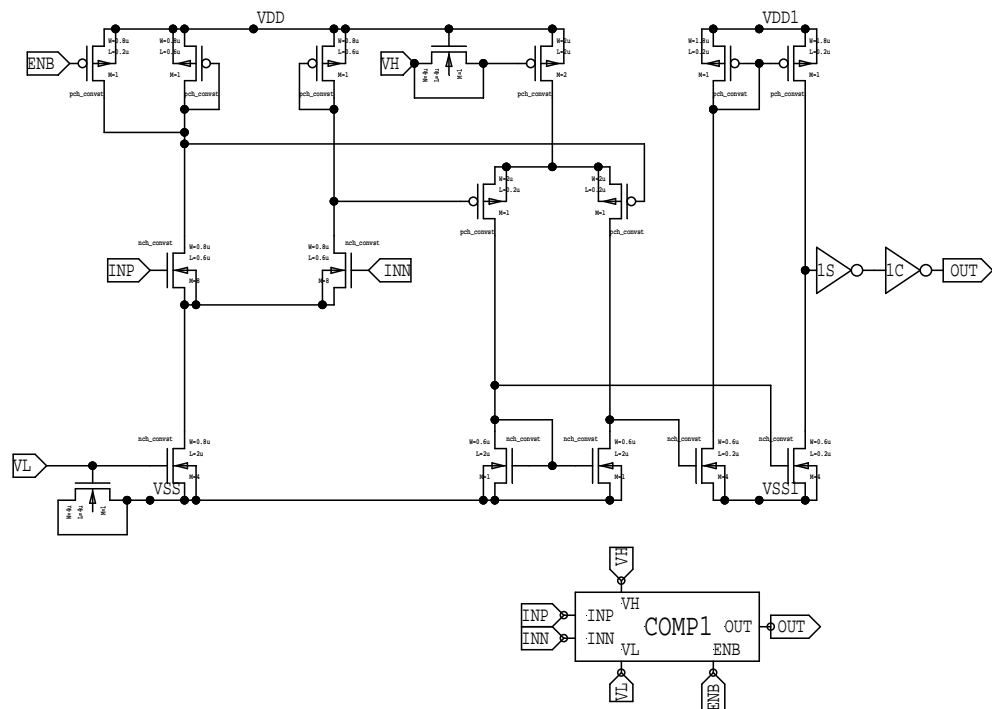


図 4.27: COMP1

4.2.27 DAC6

DAC6は4.2.26小節で述べたCOMP1のIIN(スレッシュホールド)に用いられる電位を調整するための回路である。PM02_PIXELの回路図で示してあるVREFが大まかなIINの電圧を決め、その微調整をDAC6が行う。D5の値によって電流の向きを反転させることが出来、これによってVREF

に対して電位を上げる方向にも、下げる方向にも調整できるようになっている。

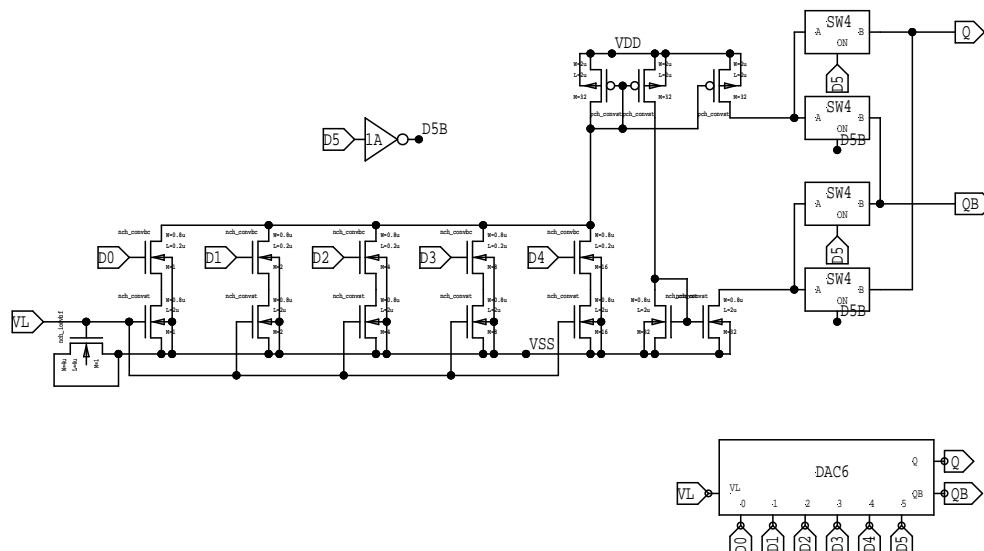


図 4.28: DAC6

4.2.28 SW4

SW4はスイッチ回路である。SW1と同様、ON=Highの間、入力Aを出力Bとして渡す。トランジスタ4つが並列に並んで用いられている為、名前に「4」が付く。スイッチ回路では並列数を大きくすることによって、スイッチをONしたときの抵抗(オン抵抗)を下げる事が出来る。よってSW4はSW1よりも低いオン抵抗値を持つ。

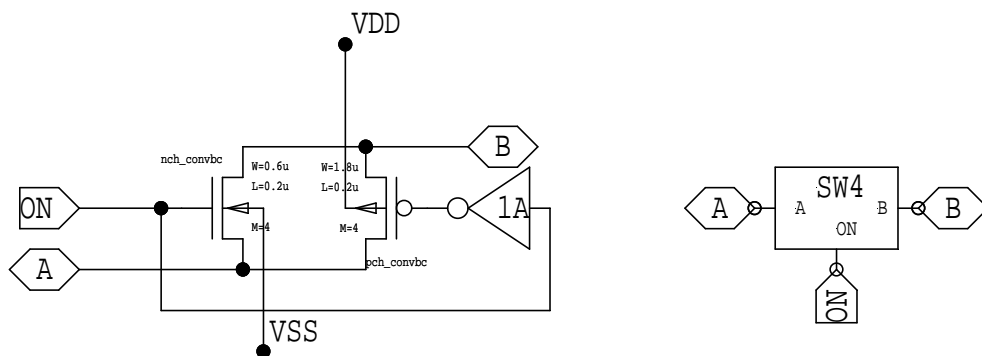


図 4.29: SW4

4.2.29 SW8

SW8 はスイッチ回路である。SW1,4 と同様、ON=High の間、入力 A を出力 B として渡す。トランジスタ 8 つが並列に並んで用いられている為、名前に「8」が付く。SW8 は SW1,4 よりも低いオン抵抗値を持つ。

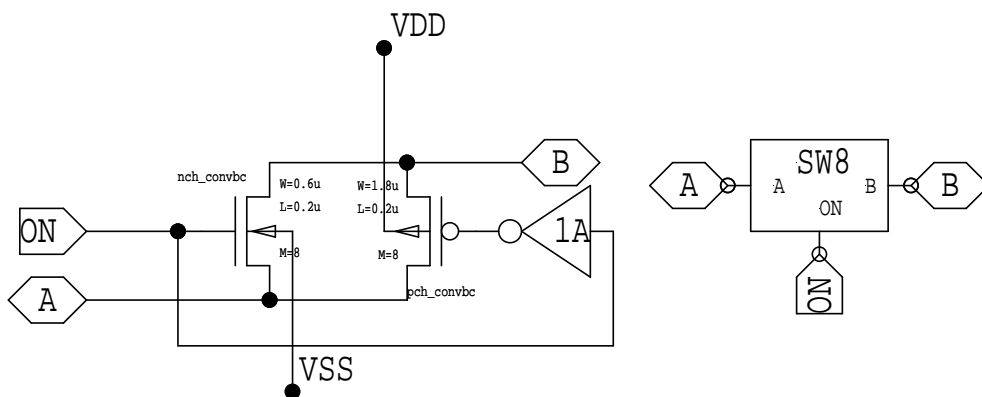


図 4.30: SW8

4.2.30 TRBUF_CO

TRBUF_CO はトライステートバッファである。E 信号が High の時、Y 端子の論理レベルは、D 端子の論理レベルに従う。一方 E 信号が Low の

ときには、D 端子からの信号は遮断され、Y 端子の出力は High でも Low でもない（第 3 番目の状態）ハイインピーダンス状態になる s。

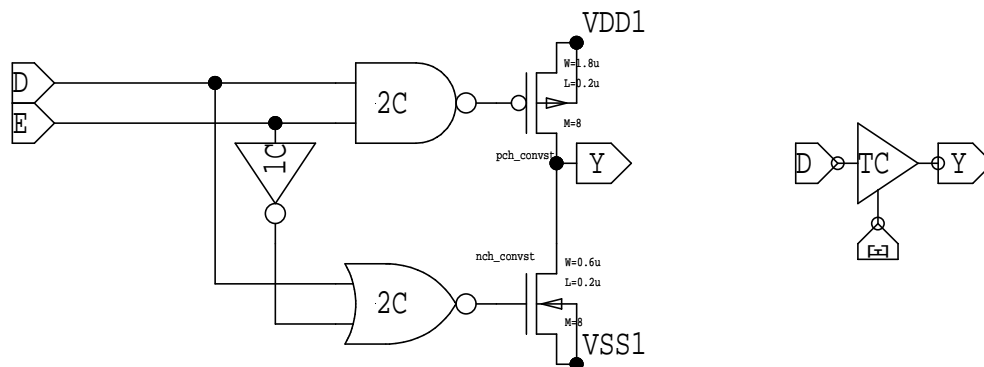


図 4.31: TRBUF_CO

4.2.31 LCR

LCR は PM02_PIXEL 回路内にある幾つかの回路の動作を操作するために用いられる回路である。

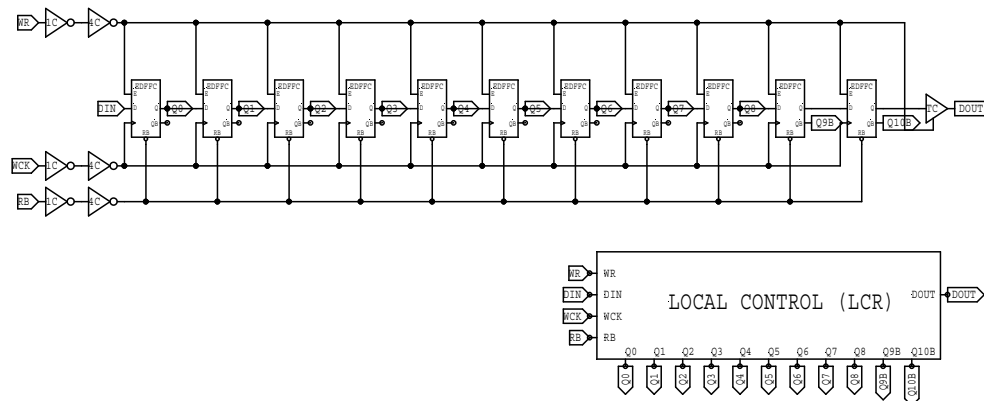


図 4.32: LCR

4.2.3 小々節でも述べた通り、DIN と WCK を上手く連動させ、目的の High,Low を 11 個の Flip-Flop にそれぞれ保持させて用いる。以下は LCR が持つ 11 個の出力の用途をまとめたものである。

信号名	用途
Q0~Q5	DAC6 の出力調整に使われる。
Q6	DMON の Enable に使われる。
Q7	AMON の Switch に使われる。
Q8	今の所使われない。
Q9B	KILLB として COMP1 の Enable に使われる。
Q10B	TPENB として、TP の Switch に使われる。

表 4.2: LCR の Q0~Q10B の使用用途

例えば COMP1 の INN は VREF を基準とするが、製造されたペアモニターのピクセル 1 つ 1 つに性能のばらつきがあったとすればピクセル 1 つ 1 つでそのスレッシュホールドが変わるという事が起こり得る。このような場合に Q0~Q5 を調整してやることでスレッシュホールドの微調整を行うことが出来る。

4.2.32 REGBNK16

REGBNK16 について

本研究では REGBNK16 回路は 2 度の修正を行った。本小々節では 2 度の修正後の最終的な回路を示す。

REGBNK16 の動作

REGBNK16 は PairMonitor に Hit した PairBackground の数を最大 16 回に分けて保存できる記憶装置である。1 回あたりの記憶は 1 つの LATCH8 が行い、その総数が 16 個あるので 16 回分記録できることになる。記憶装置の部分以外には、COUNT8 という Hit 数カウント回路も含んでおり、これは上流の COMP1 からの Hit 信号をクロック信号として受け取り、それを受け取る度に数え上げていく回路である。COUNT8 の Enable 信号として CE 信号があり、これが High の間のみ、カウントしていく。

左側にある DEC2B 回路に上流から A0~A3 電圧の Low, High の組み合わせで渡すことで、SEL0~15 信号の 1 つが High になり、SEL 信号が High の LATCH8 は選択された状態になる。この時に CE 信号が High だと、選

択されている LATCH8 は COUNT8 の出力をロードし続ける。つまり、CE=High の間 COUNT8 はカウントをし続け、またそれと同時にそのカウント情報を選択された 1 つの LATCH8 が受け取り、記録し続けることになる。同様に、選択状態で上流から RDSEL 信号が High で送られてくる間、選択されている LATCH8 の記憶情報を Q0~Q7 として上流回路に受け渡し続ける。

A0~A3 の信号は 2 進数的に

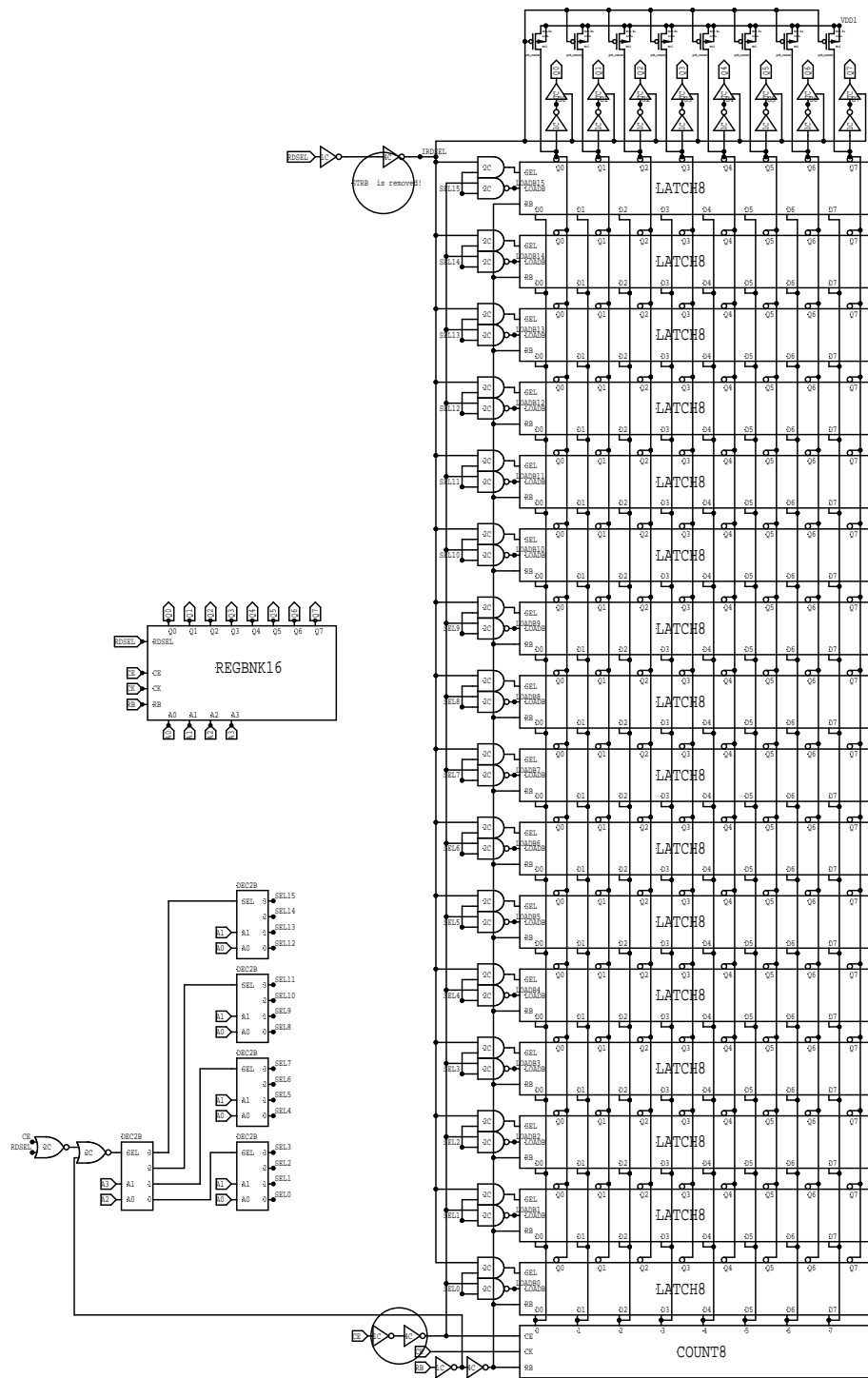
A0 : 1bit 目

A1 : 2bit 目

A2 : 3bit 目

A3 : 4bit 目

に対応しており、例えば $(A0,A1,A2,A3) = (0,0,0,0), (1,0,0,0), (0,1,0,0), (1,1,0,0) \dots$ という Low,High 信号の組み合わせによって SEL0,1,2,3, ... がそれぞれ High, その他の SEL は Low の状態になる。



4.33: REGBNK16

4.2.33 COUNT8

COUNT8 は 8bit の Grey Code カウント回路である。Grey Code については 4.2.13 小節で述べたのでそれを参照されたい。COUNT8 は CK(クロック信号)を受け取るたびにそれを数え上げる。これは CE=High の間のみ動作し、CE=Low の間は CK が届いてもそのカウント (Q0~Q7 の出力)を変えない。4.2.26 でも触れたが、COUNT8 に届く CE 信号はピクセルセンサー部に Pair background がヒットした時に生成されるものであり、つまり COUNT8 はペアモニターヒットした Pair background 数をカウントするための回路である。

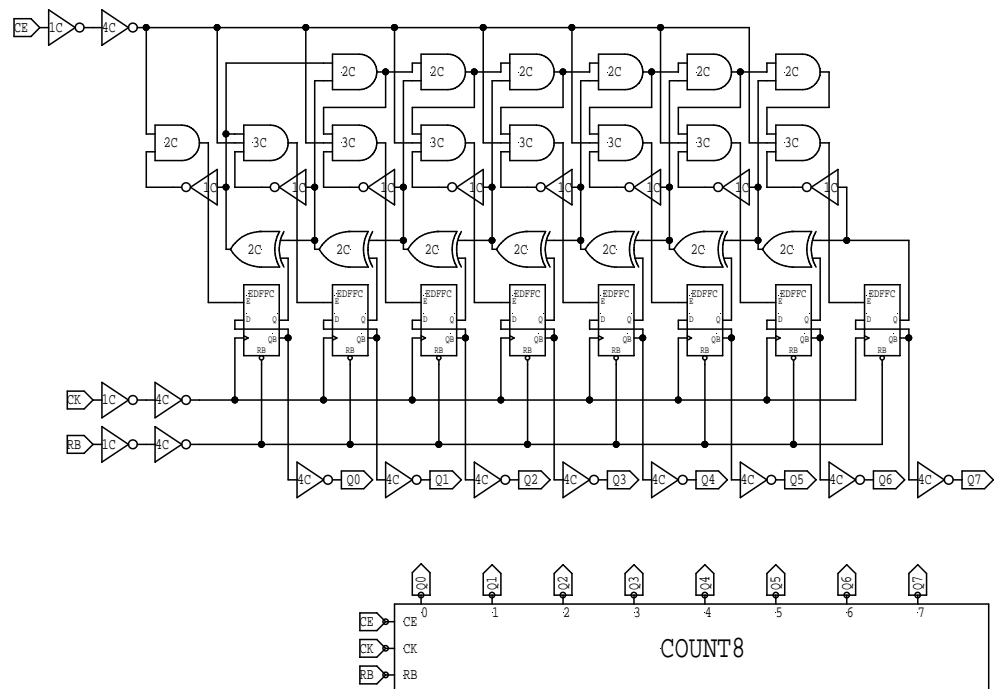


図 4.34: COUNT8

4.2.34 LATCH8

LATCH8 は 8 つの LATCHC を持つ回路であり、PairMonitor に Hit した粒子数を記憶しておく箇所である。LOADB 信号が Low として入力されている間、COUNT8 が出力している粒子カウント情報 (D0~D7) を各

LATCHCに保存させる。その後、SEL信号が送られてくるとそのデータをQ0~Q7として、上流(REGBNK16)に出力する。

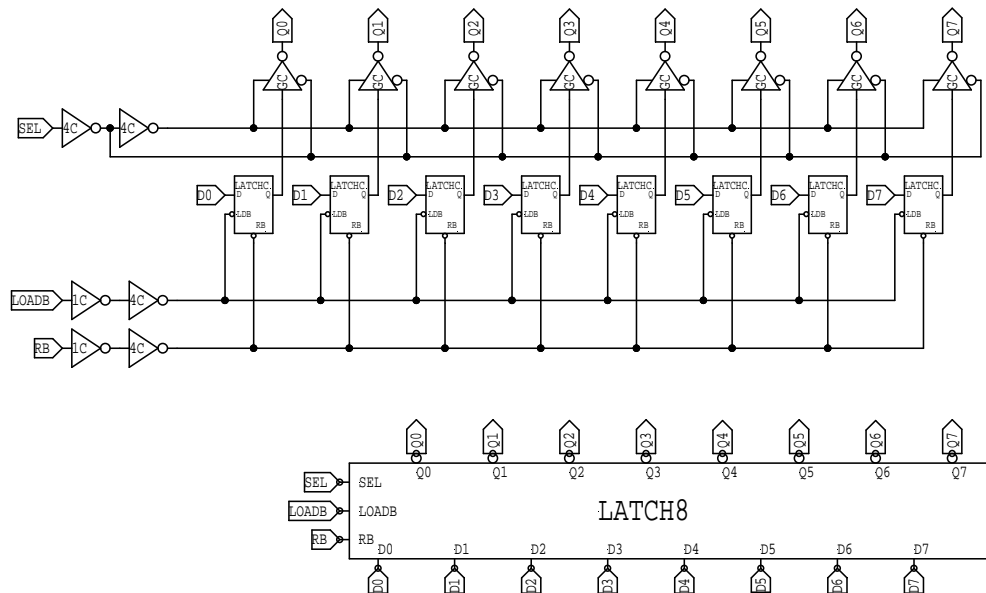


図 4.35: LATCH8

4.2.35 LATCHC

LATCHCは電位を記録することができるラッチ回路である。LDBがLowの間、Dの入力を受け付け、Qとして出力し続ける。LDBがHighの間はDの入力に依らず、最後にLDB=Lowの時に入力されていたDの値をQとして出力し続ける。

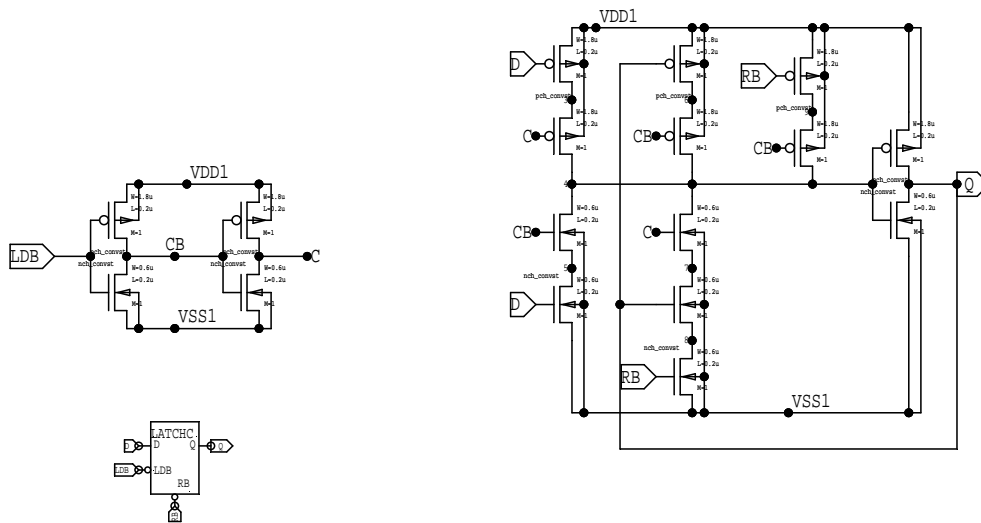


図 4.36: LATCHC

4.2.36 DEC2B

DEC2BはSELがHighの間、A0,A1の組み合わせによってQ0~Q3のうち1つだけをHighとして出力する回路である。SELがLowの間はA0,A1に依らずすべての出力はLowになる。

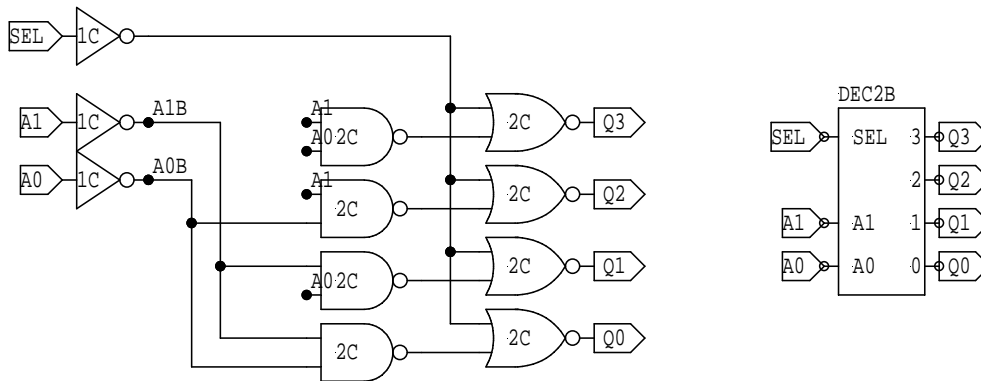


図 4.37: DEC2B

(A0,A1)のBinaryの値(0,1,2,3)に対応して、(Q0,Q1,Q2,Q3)の1つがHighになる。以下にその対応表を示す。

A0	A1	High になる出力
Low	Low	Q0
High	Low	Q1
Low	High	Q2
High	High	Q3

表 4.3: A0,A1 と Q0~Q3 の対応表

この DEC2B を 5 つ組み合わせることで、上流の COUNT4 からの出力 (A0~A3) から、16 個の信号のうち 1 つだけが High になるような信号を作り出し、これを LATCH8 の Select 信号として用いている。

第5章 回路シミュレーション

5.1 ペアモニターの読み出し回路が抱えていた課題

先行研究 [7] では、当時の回路設計で実際に読み出し回路を製作し、その評価を行っている。その評価の中で見つかった課題や、回路自体の構成的な課題として以下の6つが見つかった。

- 1) オフセット調整用の DAC 回路が動作不良
- 2) デジタル信号のレベル変換回路が電力を消費
- 3) 整形増幅器が2次のフィルターとして構成されていなかった
- 4) I/O 用のトランジスタと Core 用のトランジスタと併用していた
- 5) 論理回路、スイッチにおいてボディーフローティングのトランジスタを使用していた
- 6) Gray-code カウンタが標準的な回路でなかった

これらの課題克服を目的とし、読み出し回路のアップグレードの開発を行った。これらの回路設計の原案は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の池田博一教授に作成して頂いた。アップグレードを行った読み出し回路を PM02A と名付けた。

5.2 研究課題

私が取り組んだ研究課題は、5.1 節で説明した新しい回路を、回路シミュレーションにより評価することである。新しい回路が持つ様々なパーツについて、実際のオペレーションを意識した信号入力を行い、それによる挙動を評価した。

5.3 シミュレーションソフト

本研究では Tanner EDA 社の S-Edit, T-Spice, W-Edit を使用した [10]。全てのツールを通して共通の構造とユーザインターフェイスが共有されており、統一された環境で回路設計、シミュレーション、解析を行うことの出来るツール群である。これら 3 つのソフトを組み合わせで設計、シミュレーション、評価を行った。

5.3.1 S-Edit

S-Edit は、回路図キャプチャのための設計環境である。可視的にマウス操作で回路の設計を行う事が出来、後にシミュレーションで用いられる T-Spice フォーマットの回路データを生成する事が出来るツールである。電流や電圧を変化させるタイミングなどの指定もここで設定しておく事が出来、動作評価シミュレーションに適した環境設定もここで行う事が出来る。

5.3.2 T-Spice

T-Spice は、アナログ/ミックスシグナル IC 設計向けの高速なシミュレータである。上記の S-Edit で可視的に生成した回路図の情報から、導線 1 つ 1 つに自動的に名前を割り当てて生成された sp 形式のデータファイルを受け取り、さらにトランジスタ 1 つ 1 つの具体的な設計情報を読み込むなどして、回路情報を具体的な物理情報を備えたデータとして構築し、この環境下で時間発展を行い電流、電圧のシミュレーションを行う事が出来る。このシミュレーション結果は W-Edit が読み込める形式のファイルとして出力される。

5.3.3 W-Edit

上記の T-Spice によるシミュレーション結果情報が入っているファイルを受け取り、それをグラフとして可視的に出力する事が出来るソフトである。電圧、電流の時間発展の様子を好きなタイムスケールで自由に、複数のウィンドウを用いて出力でき、また、各座標での具体的な値も取得出来、解析が可能である。

本節では回路の動作を評価する為に行ったシミュレーションの内容、結果の紹介を行う。修正を行った回路については修正前と修正後の回路図の比較を行い、修正後の評価内容も示す。

5.4 シミュレーション条件

4.2節では4ピクセルを備えたTOP_PM02以下の回路の説明を行った。次節以降では、1ピクセルを備えたTOP_PM02回路で行ったシミュレーションの結果を述べる。ピクセル数が増えれば増えるほど、シミュレーションの収束が厳しくなるため、少ないピクセル数から徐々にピクセル数を増やし、シミュレーションを行うことになるが、本研究では1ピクセルまでのシミュレーションのみを行ったからである。

5.5 基準電流を流す為の抵抗値について

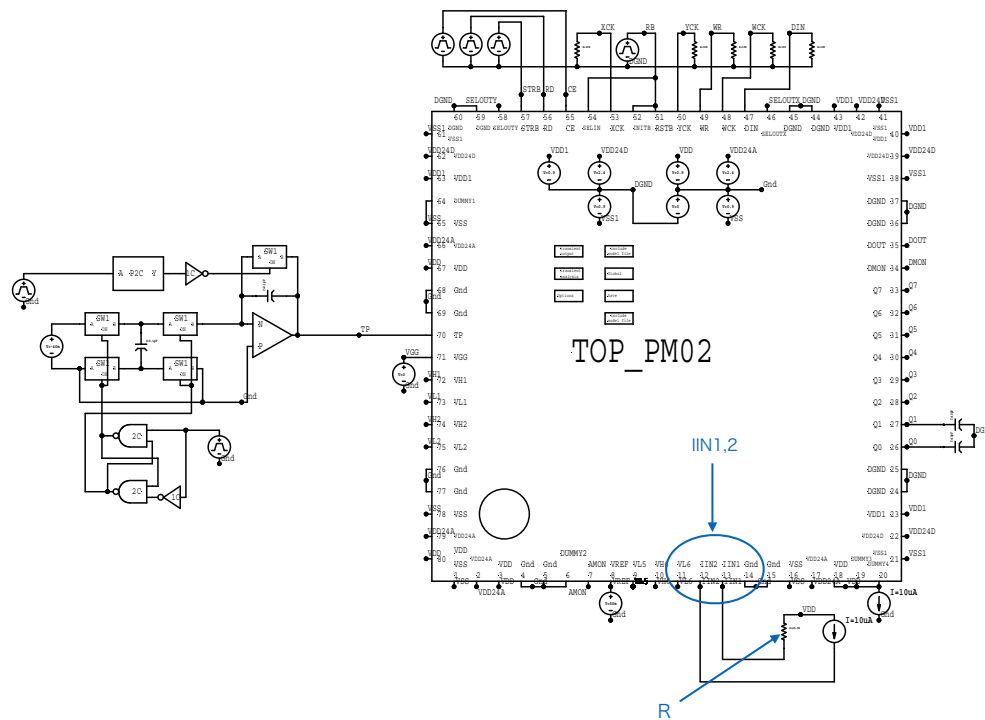


図 5.1: IIN1 と抵抗値 R

5.5.1 シミュレーション内容

PM02A 回路では、末端の回路の定電流源（ソース接地のトランジスタ）の適正な電流（ $M=1$ あたり $1\mu\text{A}$ ）を流す外部の基準電流として、最上流から流す I_{IN1}, I_{IN2} に流れる電流を $10\mu\text{A}$ としたい。 I_{IN1}, I_{IN2} に流れる電流は、回路の末端までのインピーダンスと入力電圧 V_{DD} により決まる。下流の回路のインピーダンスは現在の設計で決まっているので、流れる電流を $10\mu\text{A}$ とする為に最上流で回路に抵抗（図 5.2 の R ）を加え、この値を変更させることによって I_{IN1}, I_{IN2} を調整する。 R の値を幾つかの値で変更させていき、その都度シミュレーションによって流れる電流を測定して行き、そこから $10\mu\text{A}$ の電流が流れる為に適切な抵抗値を求めた。

なお、 I_{IN1}, I_{IN2} を結ぶ回路は定電圧源 V_{DD} に接続されているので、それぞれ電流は独立に流れる。 I_{IN1}, I_{IN2} の下流の回路は同様のインピーダンスを持つ為、今回は I_{IN1} に流れる電流値から R を見積る事にした。

5.5.2 結果

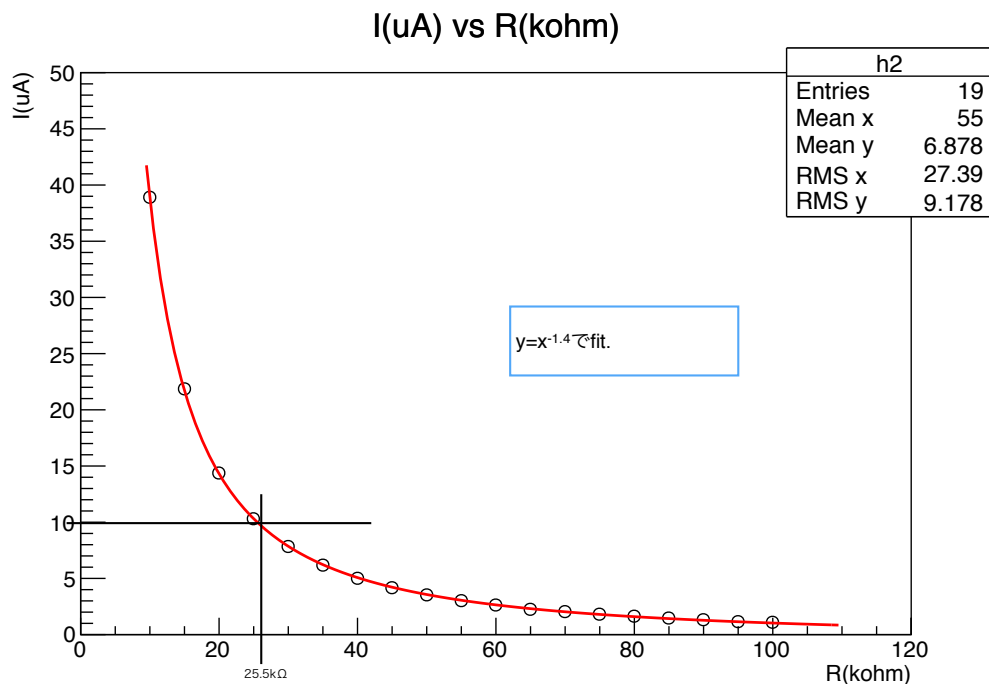


図 5.2: I_{IN1} に流れる電流と抵抗値

グラフはほぼ $V=IR$ という形を示している。グラフより、 $R=25.5K$ を選ぶと、 $10\mu A$ の基準電流が流れることがわかった。以後、 R はこの値に設定しておく。

5.6 XCK,YCK,XSELOUT,YSELOUT,INITB の評価

5.6.1 シミュレーション内容

- (a) $RB=High$ の間のみ、 $XSELOUT,YSELOUT$ 信号が動作すること
- (b) 1 ピクセルしかない回路なので、 XCK,YCK が 1 つ打たれると $XSELOUT,YSELOUT$ が High になること

を確認する。

5.6.2 結果

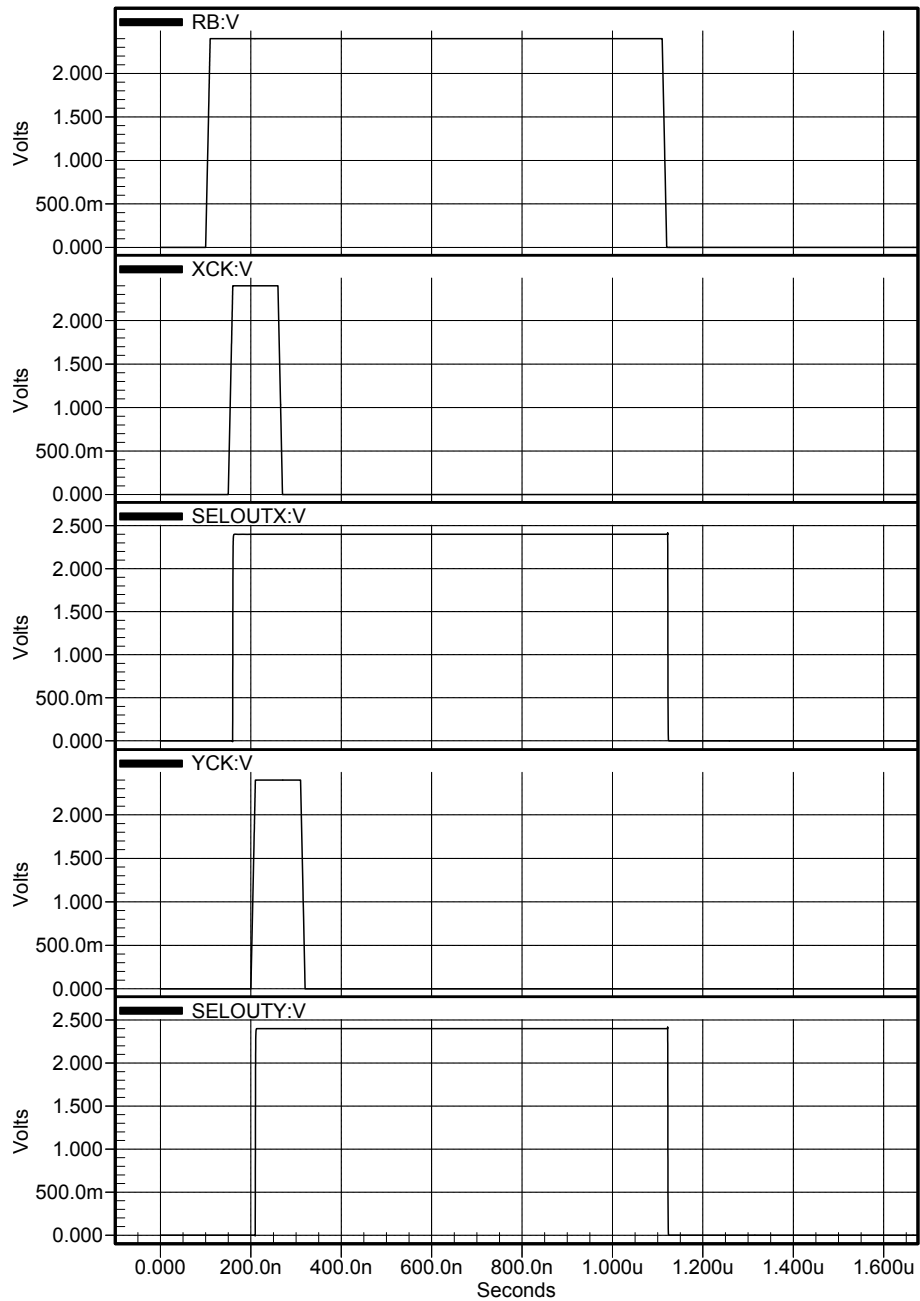


図 5.3: XCK,YCK,XSELOUT,YSELOUT,INITB の評価
INITB は RB というノード名 (信号名) として表示してある。

XCK,YCK に応じて SELOUTX,SELOUTY がきちんと出力されている。また、RB が Low になると SELOUTX,SELOUTY の 2 つが Low になり、初期化されていることも確認できる。(a),(b) 共に確認できた。

5.7 LCR(Local Control) の評価

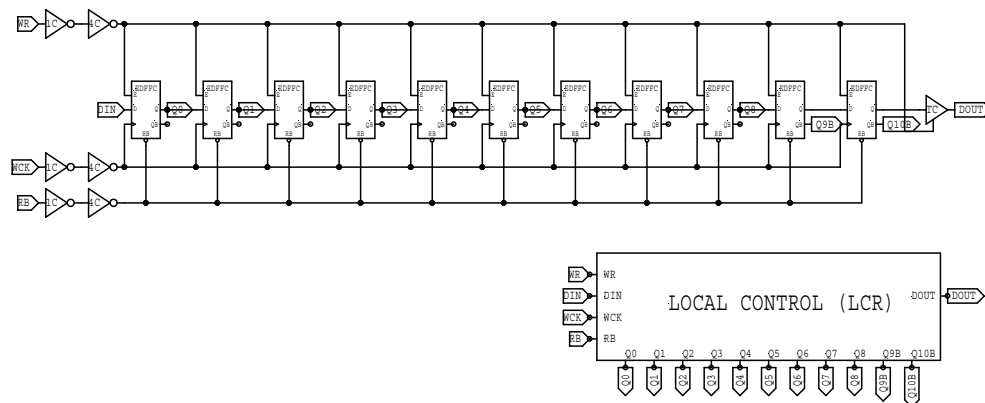


図 5.4: LCR

5.7.1 シミュレーション内容

周期的な DIN,WCK を入力し、DOUT の出力を見る。WCK が 11 回打たれると 11 個分の EDFFC を通過した DIN 信号が DOUT 信号として出力されることを確認する。

5.7.2 結果

Tanner T-Spice 15.14 C:\Users\viked\Desktop\Yamaguchi_H260916\toYamaguchi_H261202\TEST_TOP.sp 2:14:35 PM 12/4/2014

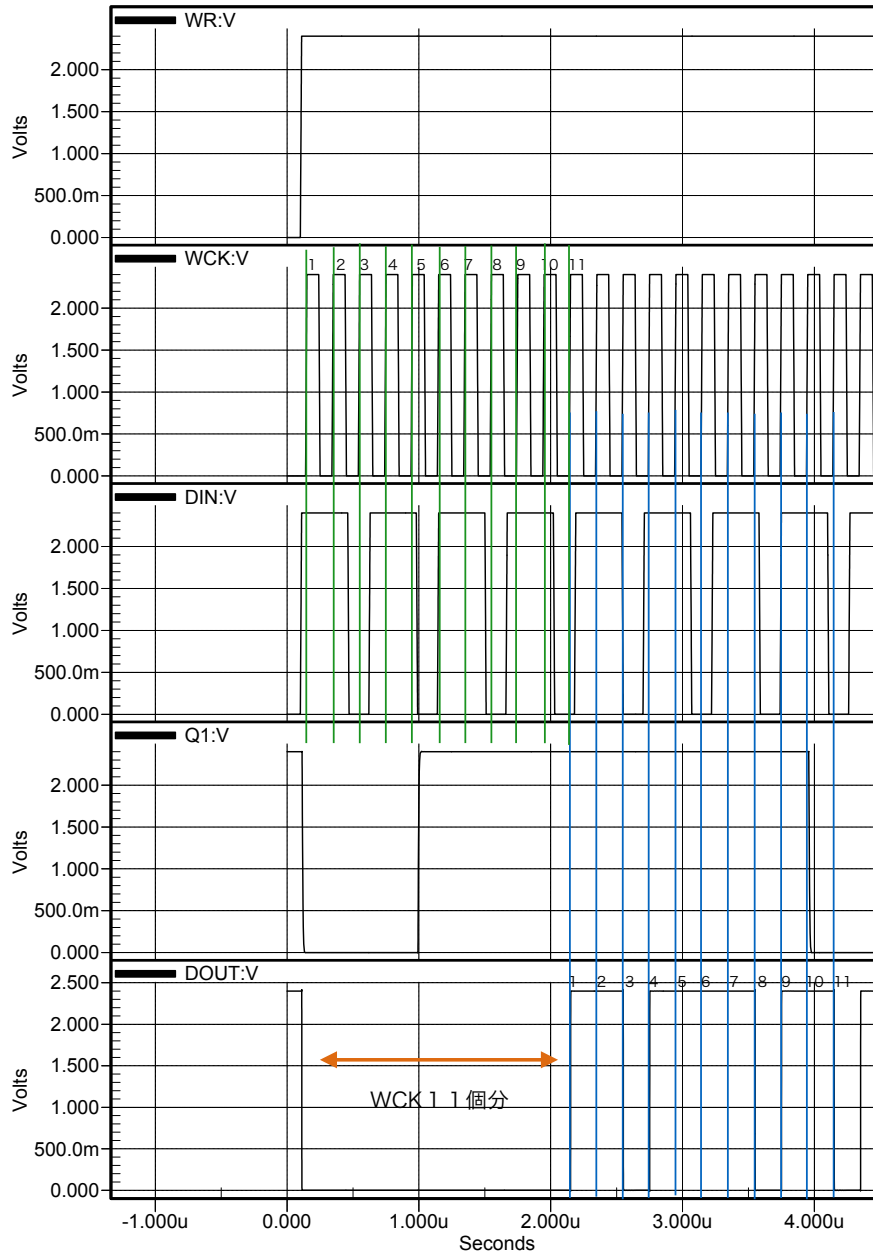


図 5.5: WR,WCK,DIN,DOUT の評価

図 5.5 において緑線は WCK が打たれるタイミング (立ち上がり) を示しており、その際の DIN の値が一番左の EDFFC に入力される事になる。緑線の近くに記述してある番号は何番目に EDFFC に入力されるタイミングであるかを意味する。また、青線も同様に WCK が打たれるタイミング (立ち上がり) を表しているが、これは 11 個の EDFFC を通過し、DOUT に出力されるタイミングにもなる。青線の近くに記述してある番号は何番目に EDFFC に入力された信号であるかを意味しており、これは緑線のタイミングで入力された DIN の値の番号の信号値と一致するはずである。例えば緑線のタイミングで EDFFC には、High,High,Low,High,... と入力が続いているが、これに対応して青線のタイミングで High,High,Low,High,... と出力が続いている。入力と出力が正しく WCK により動作し、一致していることが確認できるので、LCR はきちんと動作していると評価できた。

5.8 COUNT8 の評価

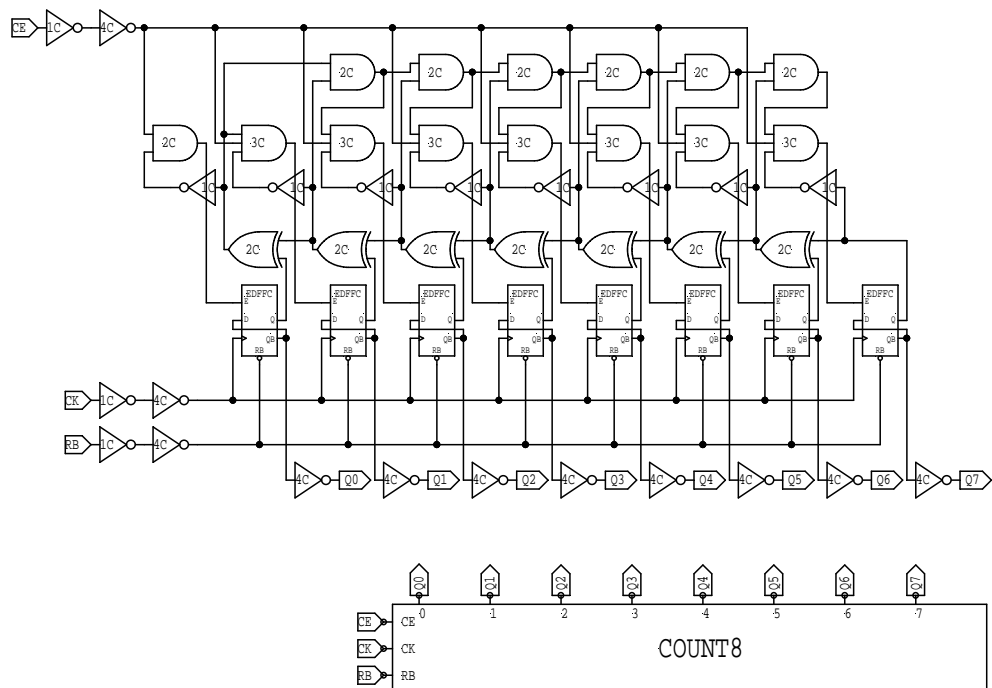


図 5.6: COUNT8

5.8.1 シミュレーション内容

周期的なクロック信号を入力し、それに応じて Q0~Q7 までの出力が、正しい 2 進数カウンタの出力になっていることを確認する。

5.8.2 結果

Tanner T-Spice 15.14 C:\Users\ikedal\Desktop\Yamaguchi_H260916\toYamaguchi_H261202\TEST_COUNTER.sp 3:43:34 PM 12/4/2014

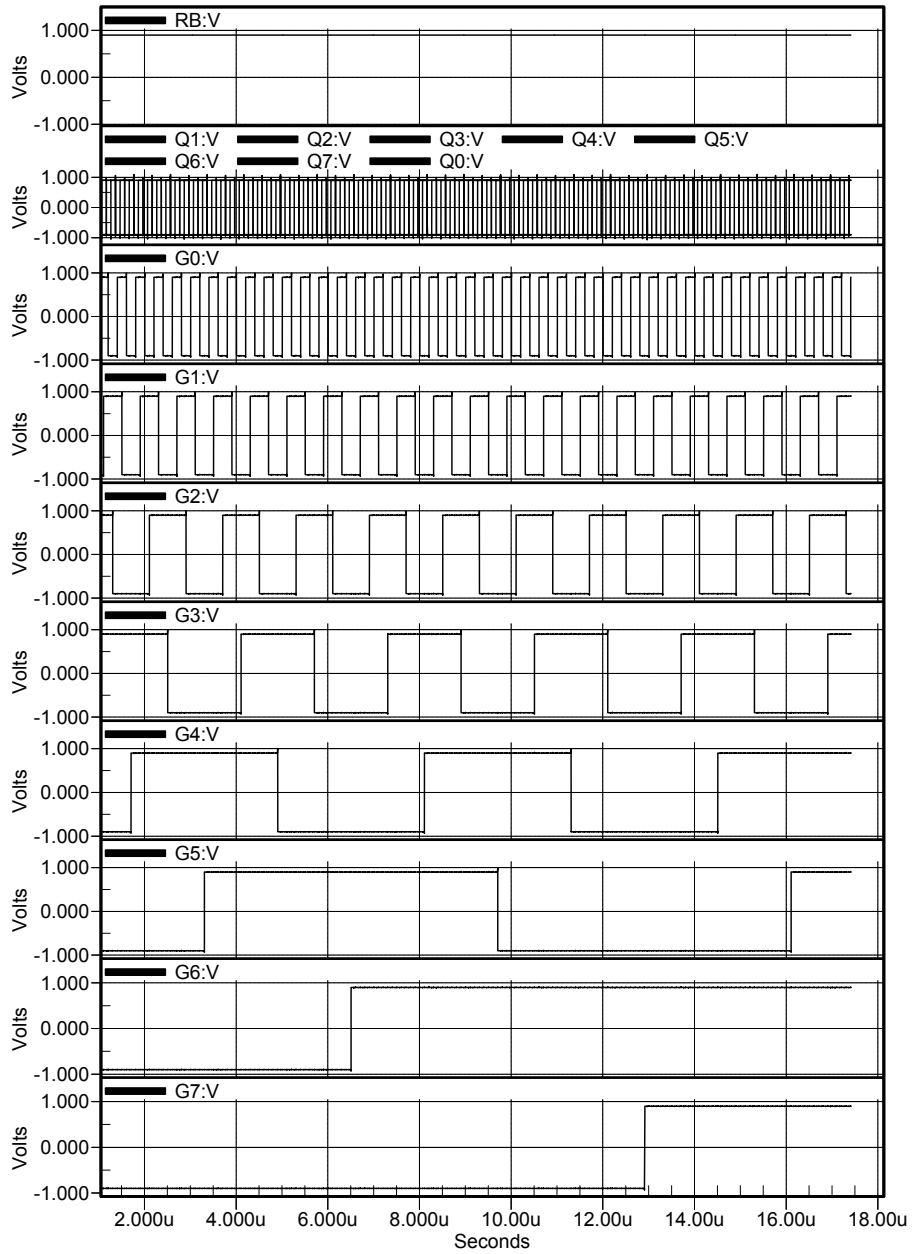


図 5.7: COUNT8 のシミュレーション結果

Q0~Q7のノード名はG0~G7となっている。正しく2進数カウントが行われている事が評価できた。

5.9 REGBNK16の初期回路の評価

REGBNK16は修正を2回繰り返し、最終的な回路は本節で見せる回路図の物とは一部異なる。最終的な回路図は4.2.32小節で紹介しているものと、修正後の評価について述べている5.11節のものであることに注意されたい。本節では初期のREGBNK16に対するシミュレーションによる評価と、そこで見つかった問題点について述べる。これらの結果は修正後の評価とも比較され、また、修正後の評価基準にも用いられる。

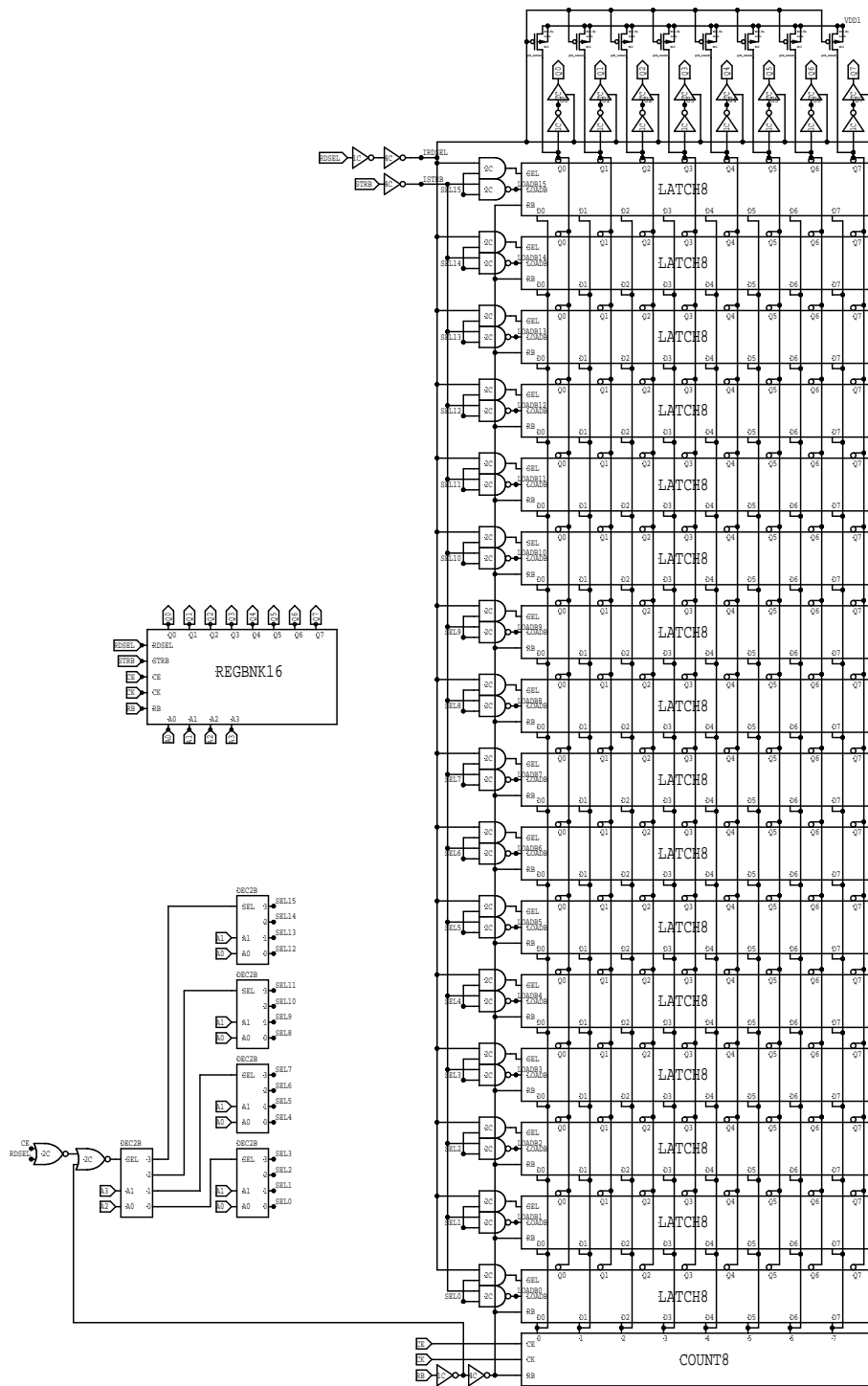


图 5.8: REGBNK16 初期回路

5.9.1 シミュレーション内容

本シミュレーションでは、回路の最上流 (TOP_PM02) からシミュレーションをかけた。期待される動作として、

- CE(Count Enable) 信号が High の間、COUNT8 が ANALOG からの Hit 信号をカウントしていく。
- STRB 信号を打ち、SEL 信号を変えていき、それによって選択されている LATCH8 に、STRB=Low となっている間、COUNT8 からの値を Load する。
- Read 信号を受け取ると、その時選択されている LATCH8 から Data を読み出し、Q0~Q7 として上流に出力する。
- LATCH8 の選択信号 (SEL0~SEL15) は、STRB を Clock として、CAP.DIGITAL の COUNT4 と DEC2B により作り出される。

が挙げられる。これらを評価するために、入力信号として

信号名	Period	Width
STRB	2 μ sec	1 μ sec
TP	800nsec	400nsec

を入力した。STRB の Period は 2 μ sec なので、2 μ sec 毎に COUNT8 の出力を Load する LATCH8 が変わっていく。TP の周期で COUNT8 のカウントは増えていくので、STRB の Period との兼ね合いから、Q0~Q7 の出力は各 LATCH8 で 2,3 ずつ増えていくことになる。

5.9.2 結果

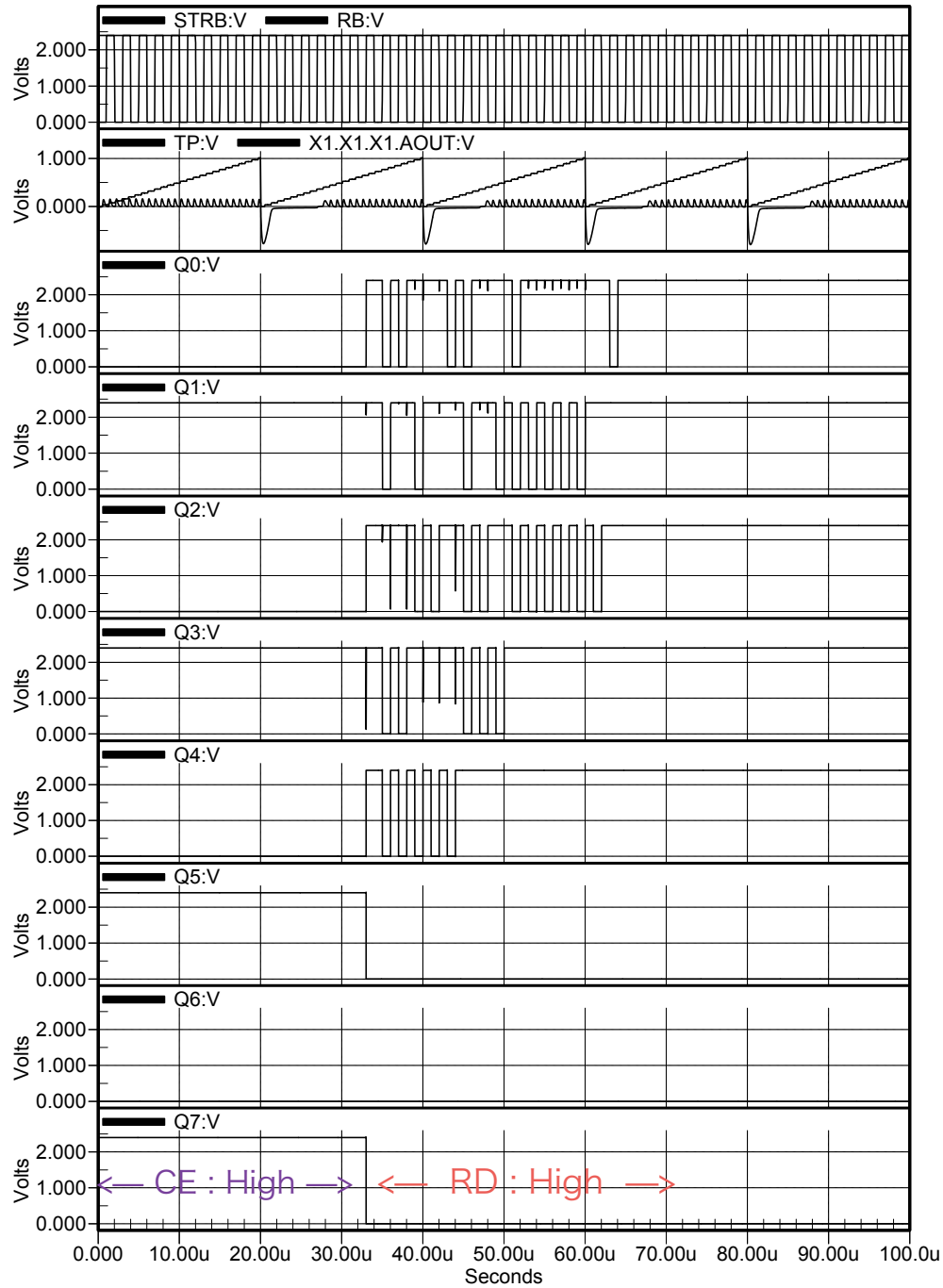


図 5.9: REGBNK16 初期回路のシミュレーション結果

図 5.9 において、Q0~Q7 までの出力を 10 進数に直すと

31 → 31 → 4 → 31 → 6 → 31 → 9 → 31 → 11 → 31 → 14 ...

となっており、期待される出力 (0 から 2,3 ずつ増えて行く) とは異なっており、値が単調増加していないことがわかった。

5.9.3 おかしい挙動の原因についての考察

上記のおかしいカウントから 31 の部分を抜くと、4 → 6 → 9 → 11 → 14 ... となり、正しくカウントしていることがわかる。31 の値が出力されるタイミングは、図 5.9 より、STRB 信号が Low となった時であることがわかる。これらの情報から、Read 中でも STRB 信号が Low になるタイミングで COUNT8 の出力が LATCH8 に Load されてしまうことが原因だとわかった。

状況を整理すると、

(a) TP の出力をカウントする段階

1. CE=High の間、TP からの出力を COUNT8 は正しくカウントし続ける。
2. STRB の立ち上がりのタイミングで SEL 信号が変わり、LATCH8 の選択が変わる。
3. 選択された LATCH8 に、STRB 信号が Low になっている間、この時の COUNT8 の出力が Load される。
4. これを繰り返し、16 個の LATCH8 に各時点での COUNT8 の値を保存させる。(CE=High の間、COUNT8 は単調増加的にカウントを続けている。)
5. CE=Low とし、カウントをストップする。カウントをストップしたので、TP が入力され、その情報が COUNT8 に Clock として入力され続けられるものの、それを受け付けない。また、カウントはストップしたが最後のカウント値 (31) を COUNT8 は出力し続ける。

(b) 各 LATCH8 に保存されている値を読み出す段階

1. RD(Read 信号)=High とし、選択された LATCH8 の出力を Q0~Q7 として上流に渡す。
2. STRB 信号 (立ち上がり) により、SEL 信号の値を変え、LATCH8 の選択を変え、出力を渡す。
3. SEL 信号を変えるために打った STRB 信号が Low になると、Read 中の LATCH8 に COUNT8 の現在の出力 (=31) が Load され、それがその LATCH8 の出力として Read され、上流に渡される。
4. その結果、本シミュレーションでは STRB=High で Select されていた LATCH8 の出力は、 $2\mu\text{sec}$ の Read 時間の内、STRB が High である $1\mu\text{sec}$ は正しい値となっており、STRB が Low になる後半の $1\mu\text{sec}$ の間は 31 の値が出力されていた。

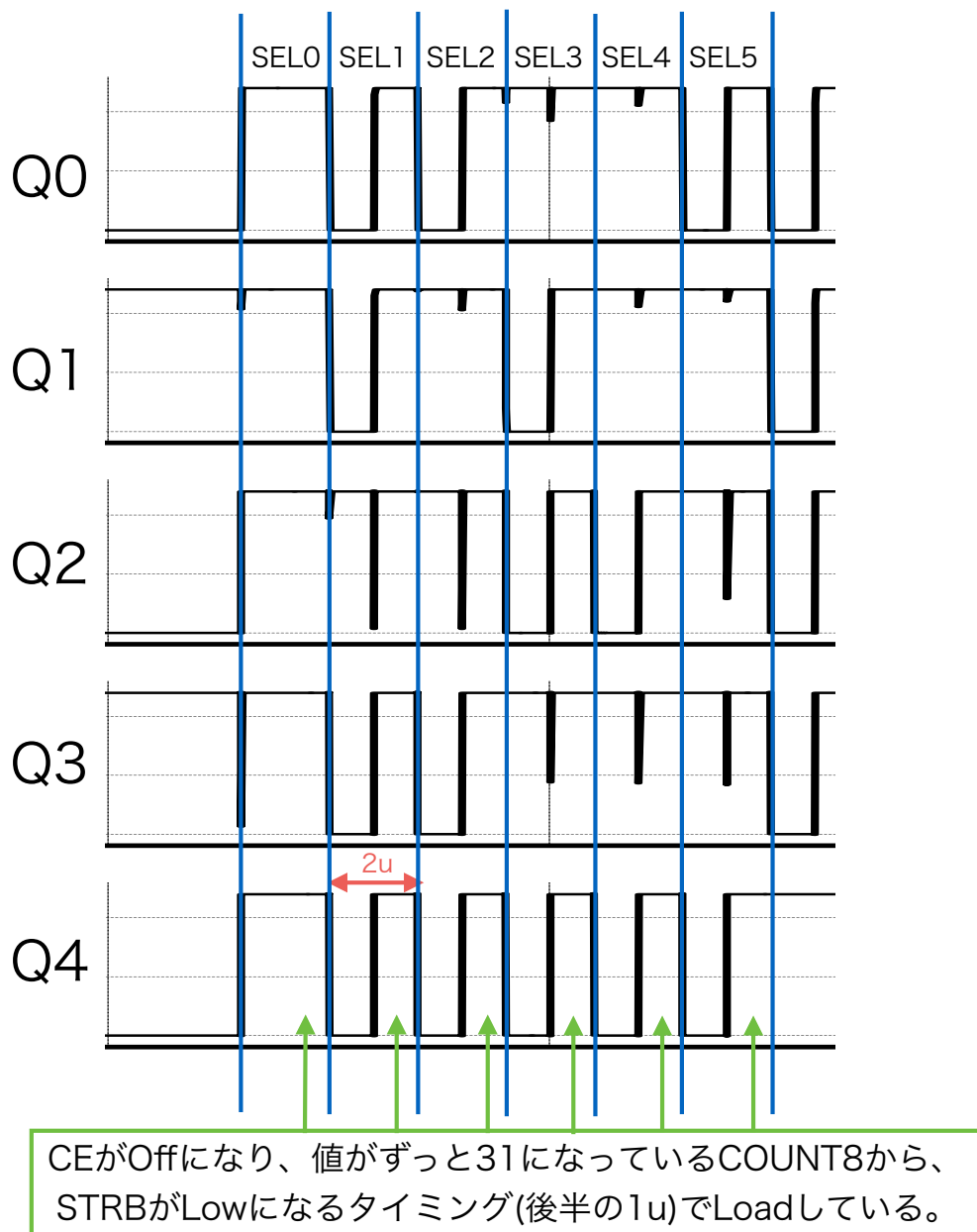
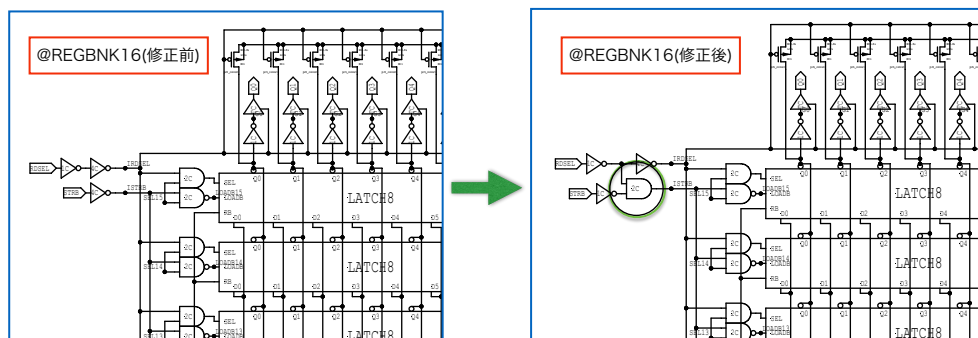


図 5.10: おかしい挙動の原因に関する図

このような状態を改善する為には、Read 中に SEL 信号を変える時は、Load を出来ないように回路を設計し直す必要があると言える。

5.10 REGBNK16 Read中のSEL信号生成の 為のSTRBによるLoadを防ぐ為の回路修 正とその評価



修正前

RDSELによりDataをReadすると同時にSTRB(立ち下がり時)によりDataを書き込むということが起こり得る。

修正後

RDSELの反転信号とSTRBの反転信号のANDを取ることで、Readしている時は書き込めないようにした。

図 5.11: REGBNK16 1 回目の修正後の回路と修正前の回路の比較
で囲んである部分が修正箇所である。

5.10.1 シミュレーション内容

前節であげた回路の問題点を克服するように回路を修正し、その動作評価を行う。図 5.11 は修正後の回路である。

前節で見つかった改善点である、Read中にLoadを出来ないようにするために、STRBの反転とRESEL(Read信号)の反転のANDを取り、それとSEL信号のNANDをLATCH8へのLOADBに入力することでこれを実現した。本シミュレーションでは、5.9節でREGBNK16の初期回路にかけたシミュレーションと同じ条件でシミュレーションを行った。

5.10.2 結果

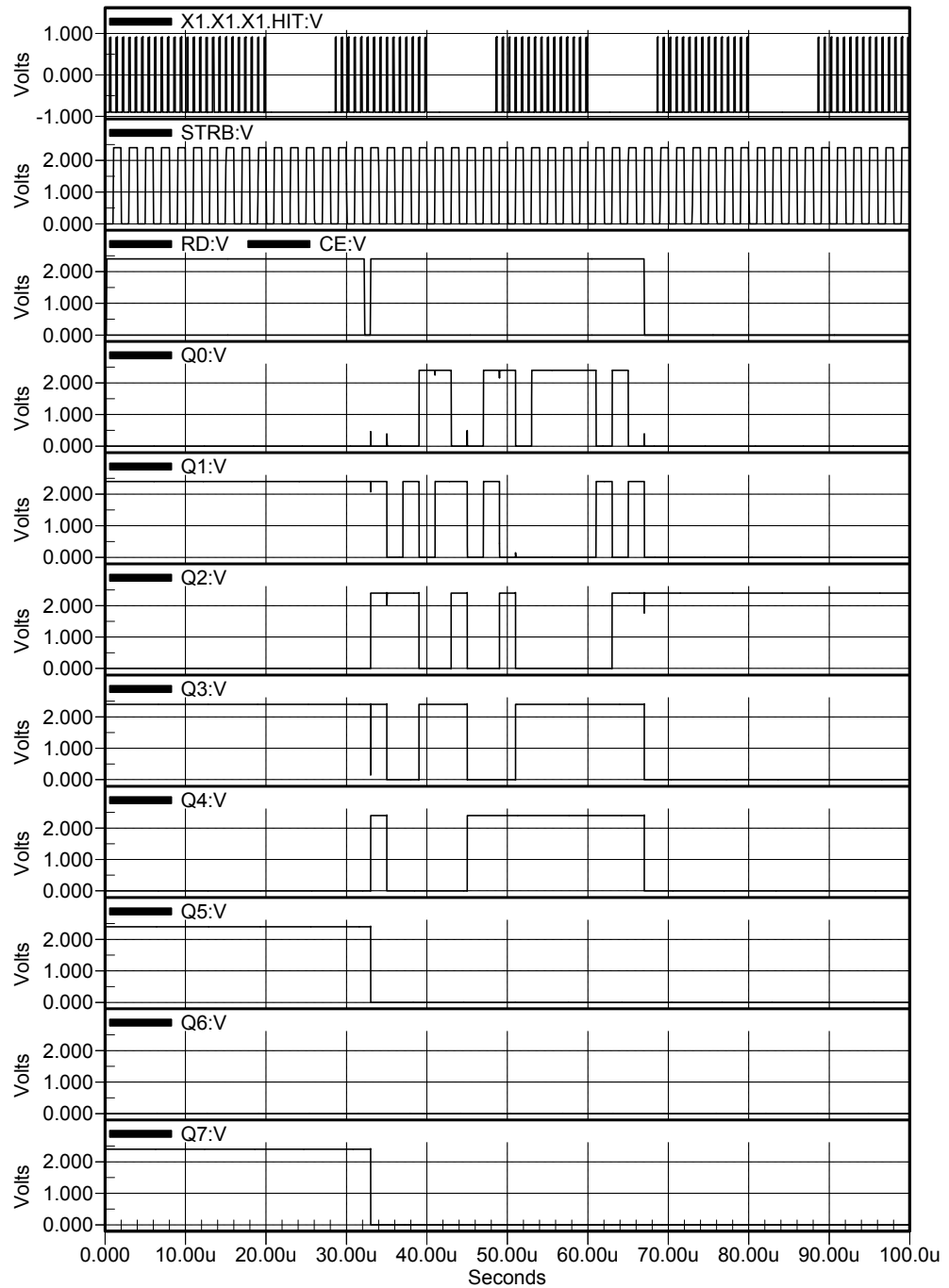


図 5.12: REGBNK16 1回目の修正後のシミュレーション結果

図 5.12 において、Q0~Q7 までの出力を 10 進数に直すと

31 → 4 → 6 → 9 → 11 → 14...

となり、SEL0 で選択される LATCH8 の信号の値 (=31) 以外は正しく単調増加しており、おおよそ正しく動作していることが評価出来た。

5.10.3 SEL0 に対応する LATCH8 の出力がおかしい事に関する考察

5.10.2 節では SEL0 以外の LATCH8 の出力が正しく行われていることがわかった。本節では SEL0 の LATCH8 の出力がおかしな値 (=31) になる原因について考察する。

以下はシミュレーション時に用いた信号のより詳細な条件と、LOADB 信号 (Low の時に LATCH8 に COUNT8 の出力を Load させる信号) を表示し、それについて考察した図である。

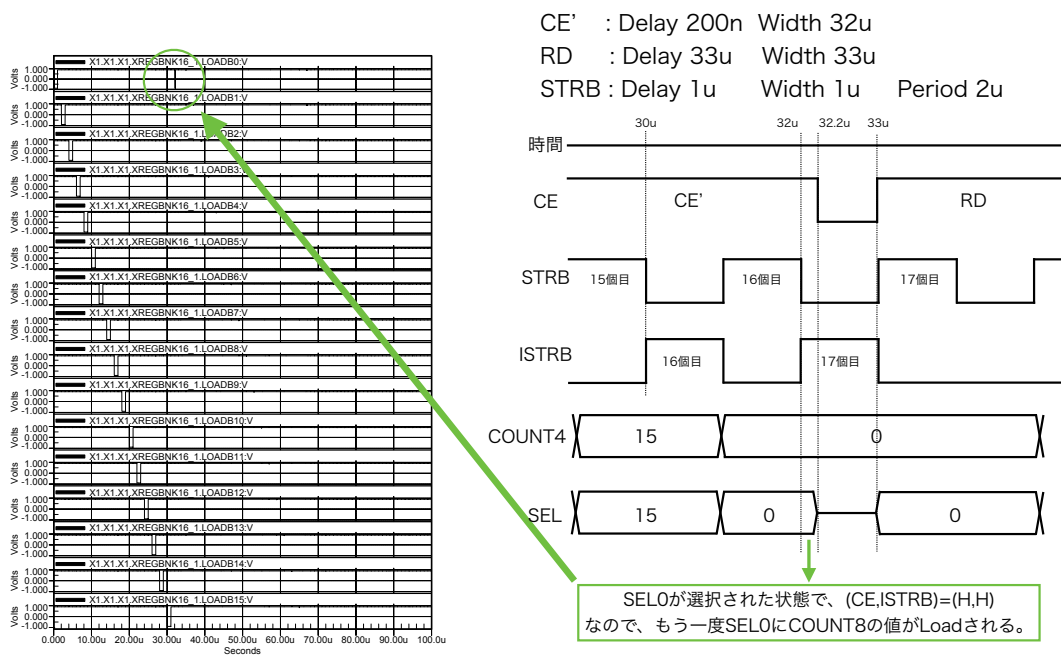


図 5.13: SEL0 信号の挙動に関する考察

図 5.13 にも明記したが、CE 信号は 200nsec の delay の後に 32 μ sec の間 High にしている。これによって STRB の 16 個目の立ち下がりが来るタイミング (32 μ sec) でも 200nsec の間は CE が High となり、この時選択されている SEL0 に対応する LATCH8 にこの時の COUNT8 のカウント情報 (=31) が Load されてしまう事がわかる。以上より、回路に異常があるのではなく、シミュレーション条件による動作であった事がわかった。

5.11 REGBNK16 操作性向上の為と、Debug 動作を可能にする為の修正とその評価

本節で述べる修正点は REGBNK16 に対する最後の修正であり、この修正後の回路は 4.2.32 で紹介したものと同様のものである。結論から言えば、本修正により、

- 4.2.32 節で正常に動作していた機能を同様に実現。
- 任意のタイミングで Read, Load 出来るようになった。これにより、
 - 操作がしやすくなった。
 - Debug 用に Read しながら Load するというモニタリングも可能になった。

という機能が実現した。以下からはこれらについて詳しく述べていく。

5.10 節では REGBNK16 がうまく動作するように修正を行った。REGBNK16 が実現している機能をまとめると、

- SEL 信号を変えて、LATCH8 を選択する。
- 好きなタイミングで LATCH8 に COUNT8 の出力を Load させる。
- Read をしている間、予期しない Load をさせない。

という 3 点である。本修正では上記の 3 点の実現を引き継ぎ、更に回路が改善された。以下に 1 回目の修正後の回路と、2 回目の修正 (今回の修正) 後の回路の比較を示す。

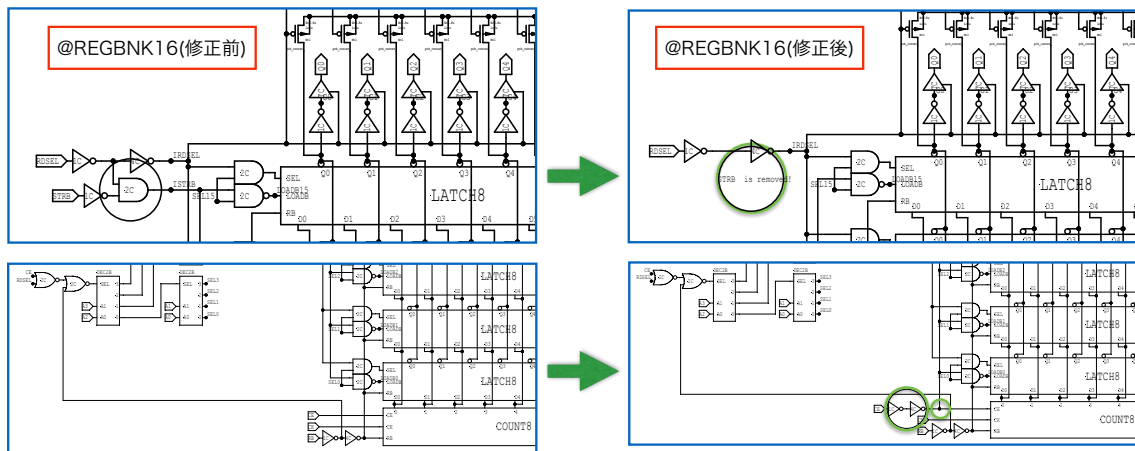


図 5.14: REGBNK16 1 回目の修正と 2 回目の修正の比較

図 5.14 にあるように、修正点は

- Load 信号は CE 信号と SEL 信号の NAND を用いるようにした。
- STRB を取り除いた。

の 2 点である。

この修正により、選択されている LATCH8 に対して、STRB の High, Low に依らず Load, Read は CE, RDSEL の 2 つの信号で任意のタイミングで行われるようになった。また、REGBNK16 で STRB 信号が直接用いられなくなった事により、STRB は CAP_DIGITAL にて COUNT4 の値を変えるのみの役割、つまり SEL 信号の変更を行う役割としてのみ用いられるようになった。

これらをまとめると、本 5.11 節の冒頭でも述べたが、

- 4.2.32 節で正常に動作していた機能を同様に実現。
- 任意のタイミングで Read, Load 出来るようになった。これにより、
 - 操作がしやすくなった。
 - Debug 用に Read しながら Load するというモニタリングも可能になった。

という機能が実現したということである。

5.11.1 シミュレーション内容

本シミュレーションでは、5.9.1 節、5.10.1 節で REGBNK16 の初期回路にかけたシミュレーションと同じ条件でシミュレーションを行った。

5.11.2 結果

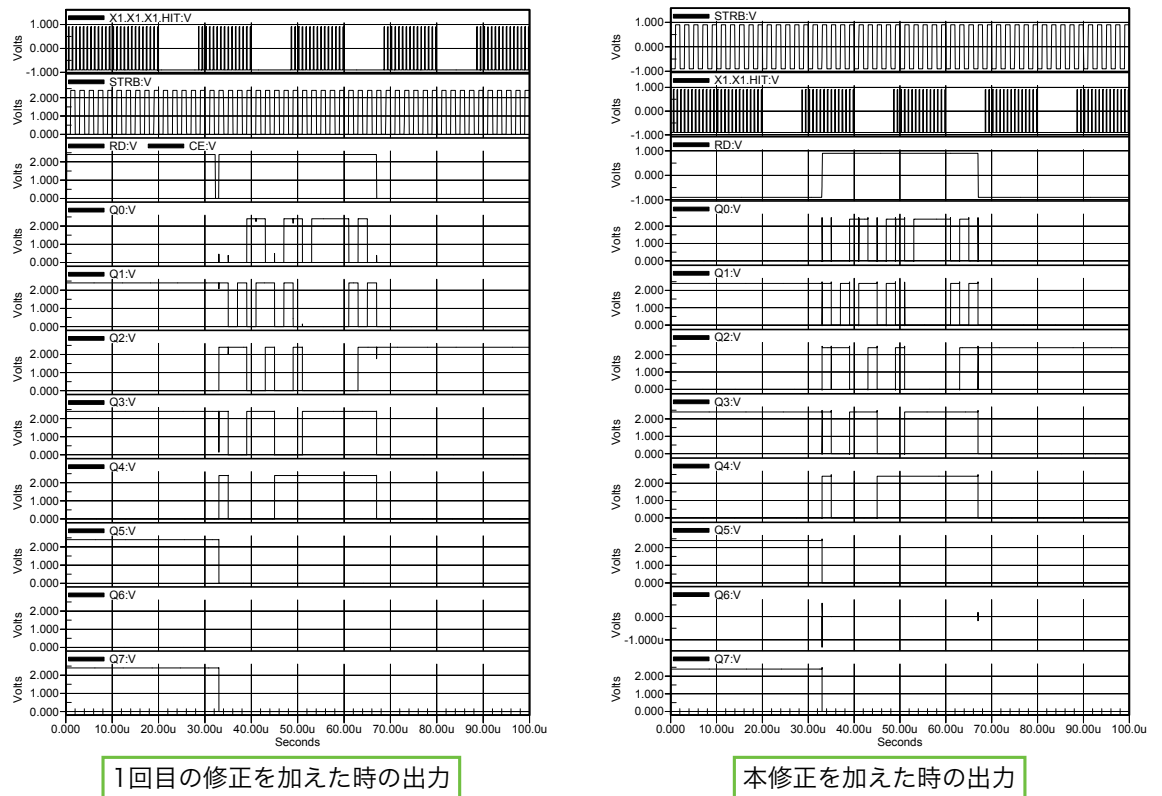
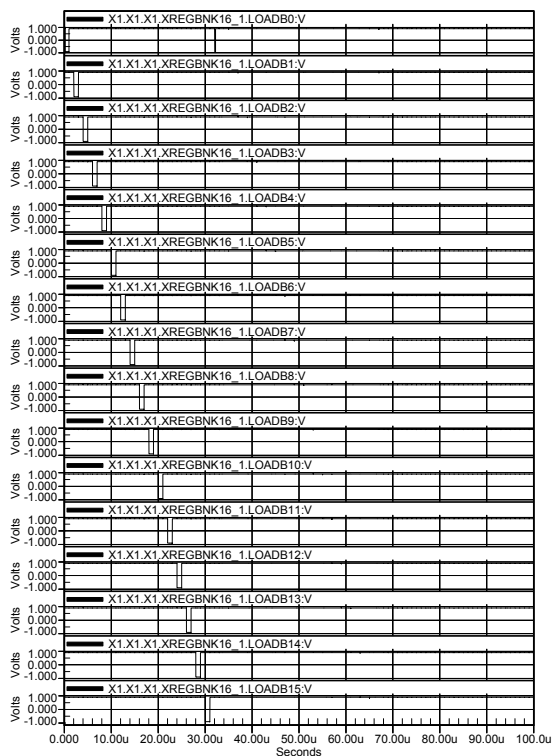
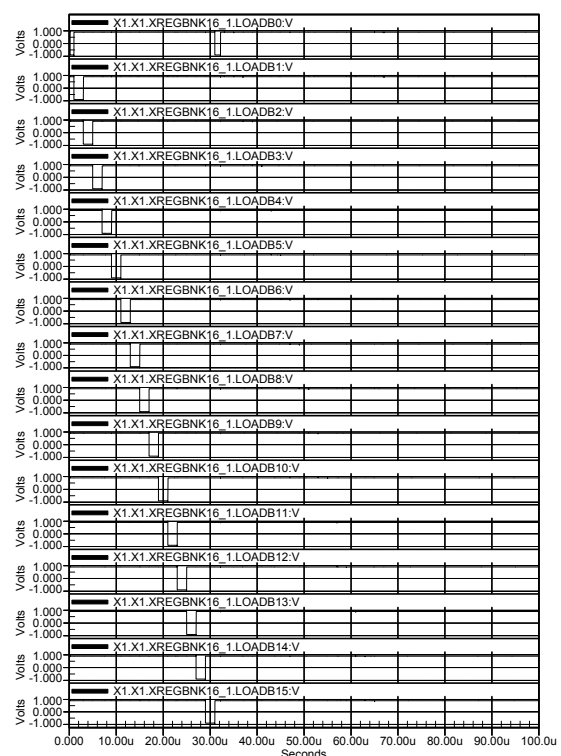


図 5.15: 1 回目の修正と本修正の Q0~Q7 の出力結果の比較



1回目の修正時のLOADB



本修正時のLOADB

図 5.16: 1 回目の修正と本修正の LOADB の出力結果の比較

図 5.15、図 5.16 からわかるように、正常に動作していると評価された 5.10 節の回路の出力と、同様の出力を本修正後の回路も出力しているのがわかる。よって、本修正後の回路も正しく動作していると評価出来る。

5.12 その他の回路修正

5.12.1 CAP_TOP で作られる XSEL, XSELOUT の Reset に関する回路修正

4.2.10 小節でも述べたが、CAP_TOP では回路の修正を行った。

修正前 INITB を Low とし、回路全体を Reset しなければ XSEL, SELOUT は Reset 出来なかった。

修正後 SELIN を Low とすることでも Reset 可能となった。

という機能改善を行った。以下に回路の修正点を比較した図を示す。

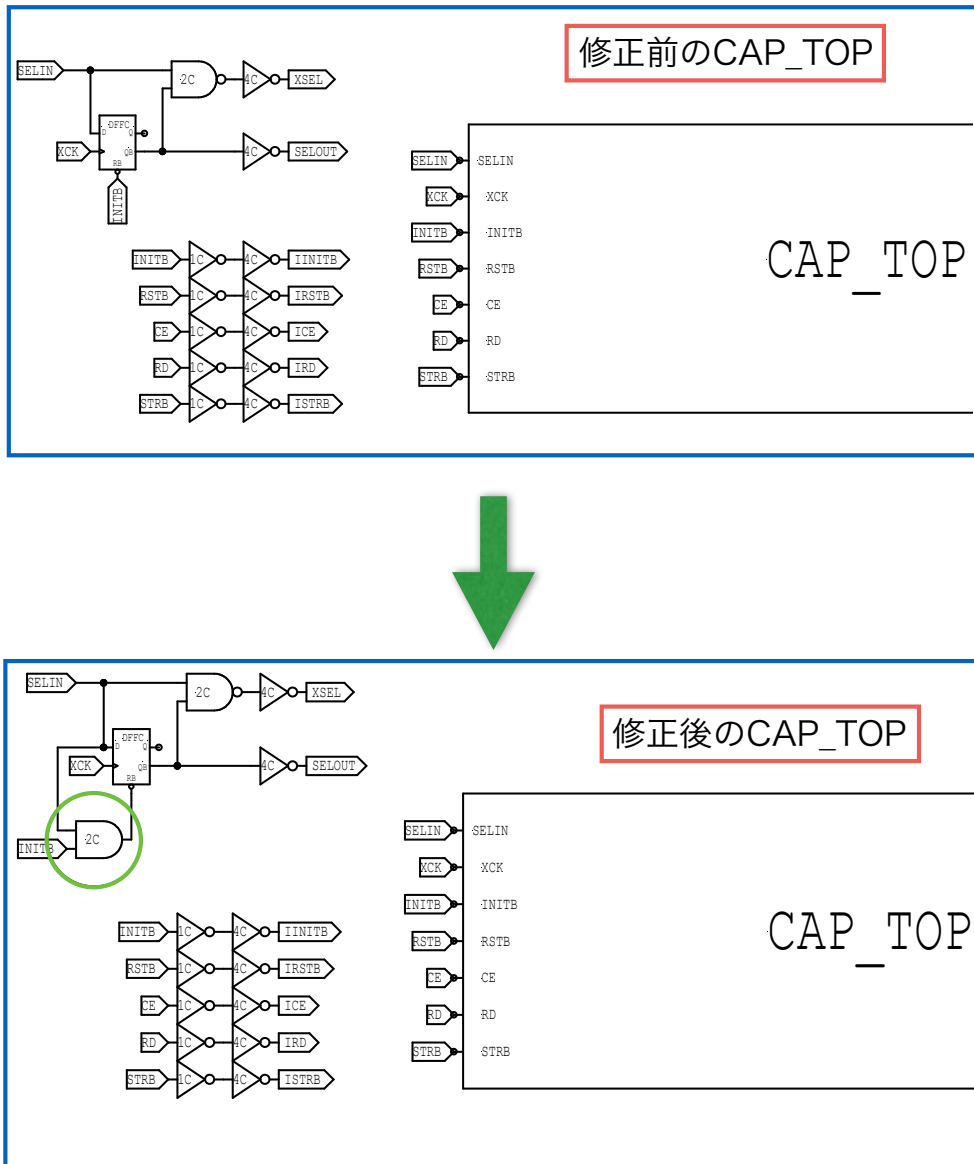


図 5.17: 修正前と修正後の CAP_TOP の比較

図 5.17 にあるように、XSEL,XSELOUT を作り出している DFFC の RB 入力を、SELIN と INIT の AND として入力することで、SELIN を Low

にする事でも Reset を行うことが出来るようになった。これにより、システム全体を Reset せずとも XSEL,SELOUT を Reset することが出来る。

5.12.2 CAP_LEFT で作られる YSEL, YSELOUT の Reset に関する回路修正

本節も CAP_LEFT に対して 5.12.1 小節と同様目的の修正を行ったことについて述べる。

修正前 INITB を Low とし、回路全体を Reset しなければ YSEL, YSELOUT は Reset 出来なかった。

修正後 SELIN を Low とすることでも Reset 可能となった。

という機能改善を行った。以下に回路の修正点を比較した図を示す。

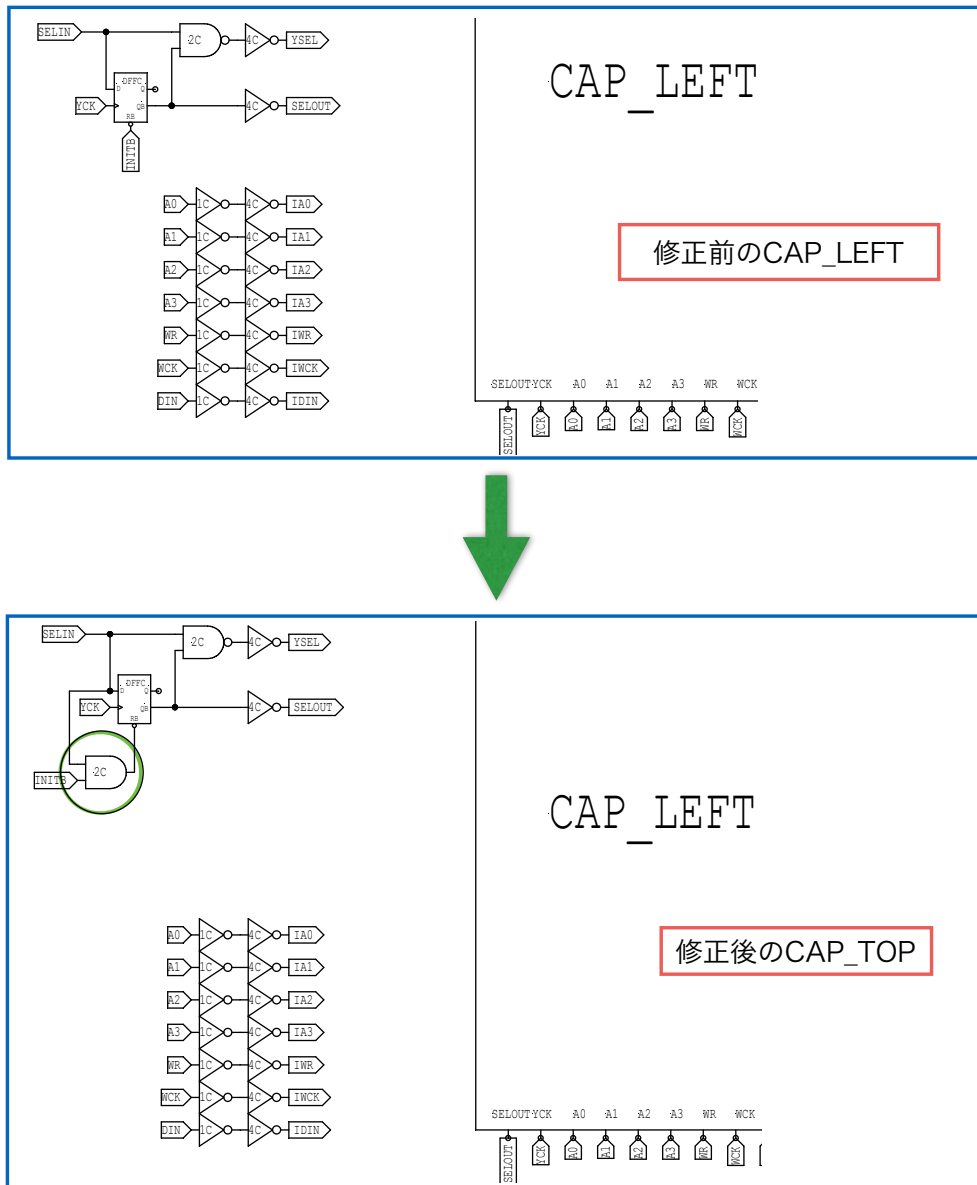


図 5.18: 修正前と修正後の CAP_LEFT の比較

図5.18にあるように、YSEL,YSELOUTを作り出している DFFCのRB 入力を、SELIN とINIT のANDとして入力することで、SELIN を Low にする事でも Reset を行うことが出来るようになった。これにより、システム全体を Reset せずとも YSEL,YSELOUT を Reset することが出来る。

5.13 回路シミュレーションのまとめと今後

5.13.1 まとめ

- 回路全体に流す基準電流 IIN1, IIN2 を $10\mu A$ とするために抵抗値を 25.5Ω とすべきだとわかった。
- XCK, YCK, XSELOUT, YSELOUT, INITB が正しく動作することを評価した。
- LCR が正しく動作することを評価した。
- COUNT8 が正しく動作することを評価した。
- REGBNK16 の初期回路は Read 中の STRB により意図しない Load を行うことがわかった。
- それを改善するように、RDSEL の反転を用いて回路の修正を行い、この回路がうまく動作すると評価できた。
- さらに、任意のタイミングで Read, Load 出来るように REGBNK16 を修正し、以下の 2 点の性能を付加した。
 - 操作がしやすくなった。
 - Debug 用に Read しながら Load するというモニタリングも可能になった。

以上の評価を、1 ピクセルでの TOP_PM02 からシミュレーションで行った。また、この他に回路の修正点として、

- CAP_TOP における XSEL, XSELOUT の Reset を行うのに SELIN も用いるようにした。
- CAP_LEFT における YSEL, YSELOUT の Reset を行うのに SELIN も用いるようにした。

も行った。

以上をもって、1 ピクセルを備えた読み出し回路：PM02A の評価を終えた。

5.13.2 今後

本研究では1ピクセル分の動作のみを確認したので、今後は4 → 16 → 25 → ... とピクセル数を増やした環境下でも回路がうまく動作するかを評価する。具体的には、このようにピクセル数を増やした CORE を持つ TOP_PM02 からシミュレーションを走らせ、TP などの信号を送り、その動作を評価していくことになる。

第6章 まとめ

先行研究時に参照されていた2007年のRDRに対して、2013年に発行された、より詳細で新しいILCの設計情報をまとめたTDR環境下においても動作するペアモニターの開発を目的として、TDRにおけるペアモニターのビームチューニング可能性をビームシミュレーションによって検証し、先行研究で見つかった課題点を克服するように設計された新しい読み出し回路を、回路シミュレーションによって評価した。

TDRにおけるビームパラメーターの再構成の可能性について

ペアモニターは、RDRの環境下で10%の精度でビームパラメーター $(\alpha_x, \alpha_y, \delta_y)$ を再構成出来ると先行研究でまとめられた。そこではビームパラメーターの変化に対する、Pair backgroundのヒット情報の変化の仕方を再構成パラメーターを用いていた。本研究では、TDRとRDRにおいて、ビームパラメーター変化に対する、生成されるPair backgroundの総数と速度方向の変化率の類似性を示すことでTDRでもペアモニターはビームパラメーターを再構成出来るものと仮定し、類似性の検証を行った。生成される総Pair background数 (N_{all}) の逆数 $(1/N_{all})$ に注目し検証を行った結果、統計量が多 $(10^3 \leq N_{all})$ となるような領域ではRDRとTDRの $1/N_{all}$ 変化率は水平方向のバンチサイズに関する α_x 、鉛直方向のバンチサイズに関する α_y 、鉛直方向の位置のずれに関する δ_y を組み合わせた変化に対して互いによく似通っており、このことから、TDRでも $1/N_{all}$ を用いてビーム情報を再構成出来ると結論づけた。

散乱される方向(Pair backgroundの運動方向 ϕ)に注目し、検証を行った結果、 α_x に対する ϕ の変化は、RDR,TDRが互いに似ており、このことからTDRでもペアモニターのヒット位置分布情報を用いて α_x を再構成出来ると結論付けた。

α_y に対する ϕ の変化は、 $0 \leq \alpha_y \leq 6$ の範囲では類似しており、再構成出来ると結論付けたが、 $6 \leq \alpha_y \leq 12$ の領域では優位な類似性は認められ

ず、RDRと同様に α_y を再構成出来るとは限らないと結論付けた。
 δ_y に対する ϕ の変化は、優位な類似性は認められず、RDRと同様に δ_y を再構成出来るとは限らないと結論付けた。

SOI-CMOS プロセス読み出し回路の評価について

1 ピクセルを備えた読み出し回路の各パーツの評価を、回路の最上流からシミュレーションをかけて行った。これにより、IIN1,IIN2に関わる抵抗値を 25.5Ω とすべきだと評価し、XCK や XSELOUT,INITB, LCR, COUNT8 が正しく動作することを評価した。REGBNK16については意図しない動作が発覚し、2回の修正を持ってこれを直した。また、その他にもCAP_TOP,CAP_LEFTの操作性を向上する為の回路修正も行った。

謝辞

本研究を進めるにあたって様々な人にお世話になり、同時にご迷惑をおかけしました。石川先生には研究の進捗を管理していただきました。山本先生には、なかなか研究が進まずプレッシャーを感じる中でも優しくお声を掛けていただき、なんとか研究を続けるきっかけをいただきました。佐貫先生には修士論文の管理をしていただき、限られた研究成果の中でも前向きなご指導を頂き、前に進むことが出来ました。土日でもメールで対応して頂き本当に助かりました。JAXAの池田さんには、回路の知識が全く無い私に、とても丁寧にご指導して頂きました。池田さんのご指導が無ければ回路部分の研究は全く進まなかったとつくづく感じます。また、KEKの田内さん、横谷さん、宮本さんにはビームシミュレーションのご指導を頂きました。プログラミングの知識も0だった私ですが、具体的なご指導を頂いたおかげでなんとか研究を進める事が出来ました。このように偉大な指導者達に恵まれた事を感謝致します。しかし同時に、研究をあまり進める事が出来ずにご迷惑をおかけした事を、ここに謝罪させていただきます。

また、指導者達以外にも様々な人にお世話になりました。研究室の学生で組織した、コーヒー組合 (HEPCA)、お茶組合 (HEPCHA)、お米組合 (HEPRA)、麻雀組合 (HEPMA) による精神的な支えが無くして修士論文を書き終えることは出来なかったでしょう。新しいボードゲーム (Gothello) を提案し、その AI を作成し、戦わせたのも楽しい思い出です。作成した AI と戦ってくれたメンバーのおかげでプログラミングの勉強にもなりました。他にもゴスペルのライブなどのイベントや、飲み会を通して様々な思い出が出来ました。また、既に卒業された卒業生の方々にも研究の手伝いをして頂いたり、遊びに連れて行って頂いたおかげで研究を続けることができたと思います。本当にありがとうございました。最後に、研究関連以外でお世話になった、家族を含む全ての方々にも感謝しています。中々お礼を言う機会が無いので、この場をお借りして感謝を述べたいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- [1] The International Linear Collider Technical Design Report
- [2] Of Luminosities and Cross Sections. http://www-d0.fnal.gov/results/publications_talks/thesis/snyder/html/node17.html
- [3] T.Tauchi and K.Yokoya、Nanometer Beam-Size Measurement during Collision at Linear Colliders、KEK-Preprint 94-122(1995)
- [4] Schulte,Daniel, Study of Electromagnetic and Hadronic Background in the Interaction Region of the TESLA Collider,1997.
- [5] O. Brning, O. Dominguez, S. Myers, L. Rossi, E. Todesco, F. Zimmermann (CERN), HE-LHC beam-parameters, optics and beam-dynamics issues, 8 Aug 2011. <http://arxiv.org/abs/1108.1617>
- [6] SuperKEKB のマシンパラメータ ナノビーム方式と低エミッタンス <http://accwww2.kek.jp/oho/OH0%20text%20archives%202005-2011/OH011%20web%20final/OH011%20funakoshi%2020110906.pdf>
- [7] 佐藤 優太郎、修士論文「国際リニアコライダーのための衝突点ビーム形状モニターの研究開発」、東北大学(平成 21 年)
- [8] 小野 善将、修士論文「高エネルギー実験のための SOI 技術を用いた PIXOR(PIXel OR) 半導体検出器の研究開発」、東北大学(平成 23 年)
- [9] 久保 浄, ILC Final Focus を考える ,2014
- [10] Tanner EDA webpage <http://tanner.jp/hiper-silicon>