

質量欠損分光のための
多芯式ドリフトチェンバー読み出し系の開発

京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室
原子核・ハドロン物理学研究室
松本 翔汰

2018 年 3 月 28 日

概要

二重ガモフテラー巨大共鳴 (DGTGR) の探索と π 中間子原子の分光 (piAF) が理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) で行われる。両実験で用いられる飛跡検出器の読み出し系として、RIBF 既存検出器系とデータ収集 (DAQ) およびオンライン解析を共通の枠組みの中で行うことができ、かつ想定されるレート耐性を満たす DAQ システムを開発し、その性能評価を行った。

両実験は共通の手法と実験条件の下で行われる。DGTGR 探索では $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}(0_2^+))$ 反応、piAF では $(d, ^3\text{He})$ 反応を質量欠損分光法により測定する。これらの核反応で放出される粒子は、超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) を分光器として運動量解析された後、運動量分散焦点面に置かれた飛跡検出器でその運動量が決定される。両実験の検出対象が軽イオンであること、また高計数率のバックグラウンド事象 (DGTGR では $t \sim 10$ MHz, piAF では $p \sim 100$ kHz) の下で安定して動作することが求められるため、多芯式ドリフトチェンバー MWDC (multiwire drift chamber) が用いられる。さらに両実験では、限られたビームタイムの中で複数の標的について系統的かつ高分解能の測定を行わなければならない。

RIBF にて実験を行う理由は、超伝導リングサイクロトロンから供給される大強度ビームを活用して統計量を上げ、BigRIPS に分散整合という手法を適用してビームの運動量拡がり打ち消すためである。しかし piAF の先行研究では、MWDC とシンチレータからの信号を同一の VME バスで読み出した結果、全不感時間 420 μs 中 170 μs を MWDC の読み出しに費やしたため、ビーム強度を最大限活かしきれていなかった。今後の両実験では最大 ~ 1 kHz のトリガーレートが予想されているため、200 μs 未満にまで不感時間を削減すれば、80% 以上の十分なデータ取得効率により高統計の測定が可能になる。分散整合とは、粒子が通過する各ビームライン焦点面上の位置を測定し、異なる運動量の粒子が標的位置および検出器位置のそれぞれで異なる位置に飛来するように磁場を調整する手法をいう。この手法を用いるためには、BigRIPS 標準飛跡検出器である平行電極間電離電子雪崩計数箱 (PPAC) と MWDC の読み出しが同期した DAQ システムによってオンライン解析を行い、その結果をフィードバックする必要がある。

MWDC 読み出し系を RIBF 汎用 DAQ ソフトウェアに組み込み、ボード毎に並列に読み出すことで、シンチレータ読み出し VME への不感時間の寄与を解消した。MWDC 読み出し回路には Belle-II CDC 読み出し用のボードにトリガータグ情報を受信する機能を持たせたものを用いた。これにより、ボード複数台分と VME のデータでイベント照合が可能となった。

本論文では、今回開発したドリフトチェンバー DAQ システムおよびその性能評価について記す。

目次

第 1 章	序章	9
1.1	物理的動機	9
1.2	RIBF における DGTGR, piAF 実験	14
1.3	データ収集システム更新の動機	17
第 2 章	データ収集システム	19
2.1	従前の DAQ	19
2.2	新規 MWDC 読み出し用 TDC	20
2.3	トリガータグ分配・受信モジュール	23
2.4	RIBF 汎用 DAQ システム	24
第 3 章	データ収集システムの性能評価	31
3.1	64ch RAINER-babirl システムのデータ収集効率	32
3.2	VME との統合	36
3.3	DAQ システムの性能	38
第 4 章	ビームを用いたデータ収集系総合テスト	43
4.1	MWDC の構造	43
4.2	CYRIC におけるテスト実験	44
4.3	MWDC のトラッキング	47
4.4	ビーム実験における DAQ システムのテスト	49
第 5 章	まとめと今後の展望	53
	参考文献	57
付録 A	新規 MWDC について	59
A.1	低圧 MWDC	59
A.2	三面交替 MWDC	59

表目次

1.1	予想エネルギー分解能への主な寄与.	14
1.2	DGTGR, piAF 実験で測定する粒子とバックグラウンド.	16
2.1	64ch RAINER ボード仕様.	21
3.1	veto 時間とデータ収集率の関係.	35
4.1	陽子のエネルギー損失と角度散逸.	45

図目次

1.1	クォーク凝縮の密度と温度による変化	10
1.2	π -N 相互作用ポテンシャルとエネルギーシフト	12
1.3	π 中間子と原子核の重なりと実効密度	12
1.4	2010 年に RIBF にて行われた実験で得られた π 中間子原子励起スペクトル	12
1.5	実効密度の質量数による変化の計算結果	14
1.6	RIBF における質量欠損実験セットアップ	15
1.7	液体水素標的 MINOS と NaI シンチレータ群 DALI2	17
2.1	各 VME モジュールの読み出しに要した時間	20
2.2	64ch RAINER ボード外観	21
2.3	64ch RAINER ボード信号, 命令処理ダイアグラム [25]	22
2.4	Nagle アルゴリズムによるデータ転送の効率化	22
2.5	Sub Trigger Module	23
2.6	VME GPIO ボード (左) と VME メザニンボード (右)	24
2.7	RIBF DAQ システムの構成	26
2.8	babirl によるデータフロー図	26
2.9	babirl によるデータフロー図	27
2.10	DAQ システムの概略図	29
3.1	RAINER TDC タイムウィンドウ設定	32
3.2	RAINER ボードのデータ収集率のトリガーレートによる変化 (上) と読み出しデータ量の関係 (下)	34
3.3	トリガーレート 7 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合	39
3.4	トリガーレート 12 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合	39
3.5	トリガーレート 26 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合	39
3.6	DAQ システムの評価用回路の概略図	40
3.7	RAINER-VME でのデータ収集効率	40
3.8	VME モジュールの読み出し不感時間	41
4.1	MWDC の構造	44
4.2	CYRIC におけるテスト実験の検出器セットアップ	44
4.3	CYRIC におけるテスト実験で使用した測定回路の概略図	45
4.4	下流側 MWDC の各面での検出効率	46
4.5	X 面で得られた TDC 分布	47

4.6	X 面で得られた X-T 曲線	48
4.7	各面でのトラッキング結果とヒット位置の残差分布	49
4.8	MWDC を用いて再構成したプラスチックシンチレータ上の陽子のヒット位置 (横軸) とシンチレータ両端の PMT で受信した信号の時間差 (縦軸)	51
4.9	64ch RAINER と VME でイベント番号を 1 つだけずらした場合の MWDC を用いて再構成したプラスチックシンチレータ上の陽子のヒット位置 (横軸) とシンチレータ両端の PMT で受信した信号の時間差 (縦軸)	51
A.1	エネルギー分解能の運動量分散による変化	59
A.2	MWDC ワイヤ構造	60
A.3	ワイヤ構造を反映したスペクトルの歪み	61

第 1 章

序章

1.1 物理的動機

1.1.1 二重 Gamow–Teller 巨大共鳴探索 (DGTGR)

スピンとアイソスピンは原子核を特徴づける重要な量子数である。特に GT 遷移演算子は $\sigma\tau$ で表される通り、スピン・アイソスピンを最も簡単な形で含むため、その応答から原子核の構造や内部相互作用に関する情報が得られる。

GT 遷移はその演算子の簡潔さから、親核のもつスピン・アイソスピンの情報のみで理論モデルに非依存な形で遷移強度の総和を書き表すことができるという、和則 [1] が成り立つ。現在確認されている二重ベータ崩壊による二重 GT 遷移強度は、和則の 0.1% 程度に止まり、残りのほとんどは高励起モードの二重巨大共鳴状態として集中していると示唆されているが、未だ実験的には発見されないでいる。この二重 GT 遷移のメインチャンネルとされる二重 GT 巨大共鳴 (DGTGR) の発見は、核構造の理解に欠くことのできない課題である。

また DGTGR は、二重ベータ崩壊と深い関わりをもつ。現在のところ二重ベータ崩壊のパターンとしては、ベータ崩壊が同時に二度起こり 2 つのニュートリノを放出する $2\nu\beta\beta$ モードのみが確認されている。ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の実験的探索は素粒子・原子核物理学において重要なテーマの一つである。 $0\nu\beta\beta$ モードの存在は、レプトン数非保存、つまりニュートリノがマヨラナ粒子であることの決定的証拠となり、物質と反物質の非対称性に対する見通しをつけることが期待されている。さらに、 $0\nu\beta\beta$ モード崩壊の半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ は、マヨラナニュートリノの有効質量 $\langle m_{\nu\beta\beta} \rangle$ と以下の関係がある。

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z)|M^{0\nu}|^2\langle m_{\nu\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.1)$$

ここで $G^{0\nu}$ は、2 電子 (陽電子) 放出の位相空間と弱結合定数から決まる、反応 Q 値と原子番号の関数で、 $M^{0\nu}$ は、 $0\nu\beta\beta$ モード崩壊が起こる確率を表し、核行列要素と呼ばれる。この核行列要素を実験的に直接求めることはできず、理論計算に頼らなければならないが、計算に用いられる原子核の核内相関に理論モデルの不定性があることが課題となっている。一方で、 2ν 核行列要素は、

$$\left(T_{1/2}^{2\nu}\right)^{-1} = G^{2\nu}(Q_{\beta\beta}, Z)|M^{2\nu}|^2 \quad (1.2)$$

で表されるように、 0ν 核行列要素と類似の構造をもち、複数の原子核について既に半減期が測定されている。 β 崩壊型の遷移には、スピン・アイソスピン反転を伴う GT 型と伴わないフェルミ型が存在するが、 2ν 核行列要素は GT 遷移演算子で記述される。そのため、二重 GT 遷移について高励起状態にまでわたる広い励起状態で測定を行い、核内相関の理論モデルを検証することは、 0ν 核行列要素の理論計算における理論モデル依存性の解消に役立てられる。

本研究の目標は、高励起状態にまでわたって二重 GT 遷移強度分布を精密に測定し、核内相関について知見を得ることである。

1.1.2 π 中間子原子精密分光 (piAF)

我々の身の周りの物質は、複数のクォークが強い力により結合したハドロンで構成されている。ハドロンの質量は、クォークの質量の和よりも遥かに大きく、典型的に 2 桁の差がある。この差は、強い相互作用が関係するクォーク・ハドロンの世界を記述する量子色力学 (QCD) の基底状態である真空が、カイラル対称性を自発的に破ることでクォーク・反クォーク対が真空中に凝縮し、その結果生じたエネルギーギャップである、と考えられている。カイラル対称性とは、QCD において近似的に質量の無視できる自由なクォークからなる系が、ヘリシティの左右独立なフレーバー変換に対してもつ不変性である。

またカイラル対称性は有限温度、密度中において部分的に回復し、ハドロンの質量も変化すると予想されている [2]。図 1.1 は、QCD のカイラル有効理論の 1 つである南部-ヨナラシニオ模型 [3] で $|\langle \bar{q}q \rangle|$ の密度と温度の依存性を計算したものである [4]。この模型は、超伝導現象の微視的模型としての BCS 理論に対応し、BCS 理論におけるクーパー対のように、QCD において自発的対称性の破れの秩序変数となるのはクォーク凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ である。カイラル対称性の回復に伴い、クォーク凝縮の強度 $|\langle \bar{q}q \rangle|$ が減少し、後述するように標準核密度 $\rho_0 \sim 0.17 \text{ fm}^{-3}$ では、真空に比べ約 30% カイラル対称性が回復するとされている [5]。

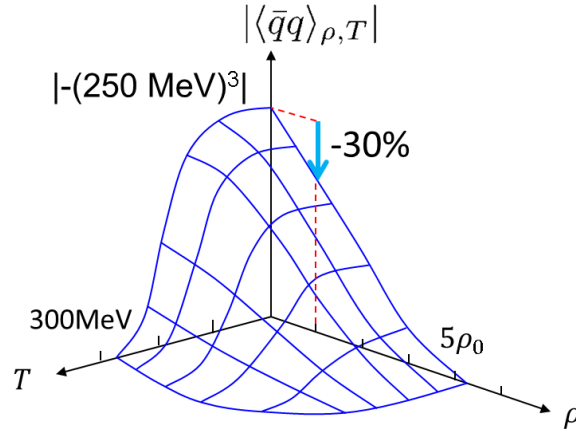


図 1.1: クォーク凝縮の密度と温度による変化 [4]。温度、密度の上昇に伴いクォーク凝縮は減少し、カイラル対称性が部分的に回復する。標準核密度 ρ_0 では真空に比べ約 30% カイラル対称性が回復するとされている [5]。

有限密度中におけるカイラル対称性の部分的回復を実験的に検証する方法として、 π 中間子原子分光がある。 π 中間子原子とは π^- 中間子が、原子核との引力的なクーロン力と斥力的な強い力により、原子軌道に束縛された系であり、 π 中間子と原子核の波動関数が部分的に重なっている。 π 中間子原子の準位エネルギー E は以下のクライン-ゴルドン方程式を解くことにより得られる [12]。

$$[-\nabla^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r)]\phi_{\pi A}(r) = [E - V_{\text{coul}}(r)]^2 \phi_{\pi A}(r) \quad (1.3)$$

ここで、 μ を π^- 中間子と原子核の換算質量、 $B.E.$ と Γ をそれぞれ π 中間子原子状態の結合エネルギーと崩壊幅として、 $E = \mu - B.E. - \frac{1}{2}\Gamma$ であり、 V_{opt} と V_{coul} は π 中間子と原子核の間にはたらく強い相互作用と電磁相互作用を表すポテンシャル項である。強い相互作用のポテンシャル項は、エリクソン-エリクソン型の光学ポ

テンソル [7] で書き表され、その s 波成分は、

$$V_s(r) = -\frac{2\pi}{\mu} \left[\varepsilon_1 \{b_0 \rho(r) + b_1 (\rho_n(r) - \rho_p(r))\} + \varepsilon_2 B_0 (\rho(r))^2 \right] \quad (1.4)$$

である．ここで、 M_n を核子の質量として、 $\varepsilon_1 = 1 + \frac{m_\pi}{M_N}$ 、 $\varepsilon_2 = 1 + \frac{m_\pi}{2M_N}$ であり、 $\rho(r)$ 、 $\rho_n(r)$ 、 $\rho_p(r)$ はそれぞれ原子核、中性子、陽子の密度分布である．式 (1.4) においてアイソベクトルに関係する散乱長として現れる b_1 パラメータは、カイラル対称な真空中で成り立つゲルマン−オクスレンナー関係式 [8]

$$f_\pi^2 m_\pi^2 = -m_q \langle \bar{q}q \rangle_0 \quad (1.5)$$

と、友沢−ワインバーグ関係式 [9, 10]

$$-4\pi\varepsilon b_1 = \frac{\omega_\pi}{2f_\pi^2} \quad (1.6)$$

の 2 つの関係式を、カイラル対称性が部分的に回復した有限密度中へ拡張して

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_\rho}{\langle \bar{q}q \rangle_0} = \left(Z_\pi^* \frac{b_{10}}{b_{1\rho}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

のように、真空中と有限密度中におけるクォーク凝縮の比と結びつく [11]．ここで、 f_π 、 ω_π はそれぞれ π 中間子の崩壊定数と特殊相対論的エネルギーで、 $*$ は有限密度中での値であることを表し、 Z_π^* は真空中での π -原子核散乱振幅を有限密度中へ規格化するためのくりこみ定数である． π 中間子原子の準位エネルギーおよび崩壊幅を実験によって測定し、その結果を再現するように式 (1.4) で表される光学ポテンシャルの各パラメータを決定できれば、実効密度におけるクォーク凝縮の大きさを定量的に評価することができる．

図 1.2 の上側は、 π^- - ^{121}Sn 原子核の相互作用ポテンシャルを示したものである [6]． $\text{Re}V_{\text{opt}}$ 、 $\text{Im}V_{\text{opt}}$ はそれぞれ s 波光学ポテンシャルと原子核の吸収効果のために取り入れられるポテンシャル虚数項である．下側は、その π 中間子原子の各 1s, 2s, 2p 状態について π 中間子の密度分布を計算する際に、電磁相互作用のみを考慮した点線と強い相互作用も加味した実線を比較している．図中の縦線は ^{121}Sn 原子核密度が飽和密度の半分になる点を示しており、引力的な電磁相互作用に斥力的な s 波光学ポテンシャルが加わることで、原子核表面のやや外側に引力ポケットを形成した結果、 π^- 中間子が原子核に吸収されにくくなり、 π 中間子原子状態が準安定的に存在できることが解る．また、s 波相互作用は 1s 状態に対して優勢に寄与していることも読み取れ、1s 状態のエネルギーシフトは 2p 状態の約 10 倍以上と計算されている [12]．図 1.3 は、上から π^- - ^{121}Sn 中間子原子についての束縛 π 中間子密度分布、原子核密度分布、 π 中間子と原子核の重なり密度分布を表している．重なり密度分布の頂点に対応する原子核密度は実効密度と呼ばれ、 ρ_e で書き表される．

ドイツ・重イオン研究所 GSI では π 中間子 ^{206}Pb 原子 1s 状態が 1996 年に発見され [13]、その後スズを標的とした実験により有限密度中におけるカイラル対称性の部分的回復の定量的評価に成功し [14]、

$$b_1(\rho_e) = -(0.1149 \pm 0.0074) \times m_\pi^{-1} \quad (1.8)$$

という結果から、標準核密度におけるクォーク凝縮が真空中に比べ 67% に減少していることを示唆した．しかしこの実験結果は真空中での値 $-(0.0864 \pm 0.0012) \times m_\pi^{-1}$ に比べて誤差が約 5 倍と大きいものであった．より高精度に b_1 パラメータを評価するために、大強度ビームを供給する超伝導リングサイクロトロン SRC、大角度アクセプタンスをもつ超伝導スペクトロメータ BigRIPS を備えた実験施設である理化学研究所 RIBF にて、 π 中間子原子精密分光実験の計画が推進されてきた．2010 年に行われた最初のパイロット実験では、新たに分散整合法というイオン光学系の調整手法によりビームの運動量拡がり部分が部分的に相殺され、1s 状態と 2p 状態の同時観測が達成された [17]．その結果を図 1.4 に示す．横軸は ^{121}Sn - π 中間子原子の励起エネルギーを、縦軸は二重微分断面を表し、図中の縦線は π 中間子生成閾値である． π 中間子原子生成スペクトルの理論曲

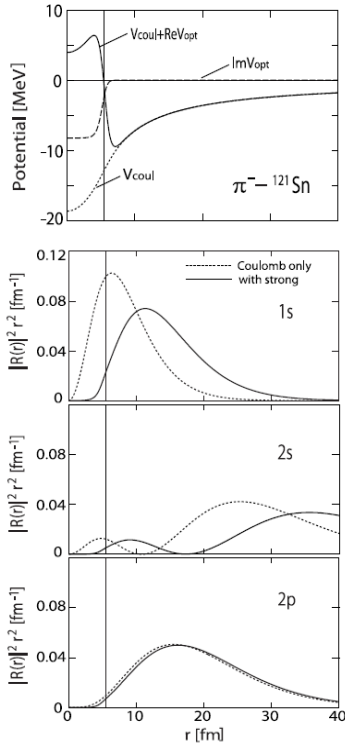


図 1.2: π -N 相互作用ポテンシャルとエネルギーシフト [6]. 点線は電磁相互作用を, 実線は電磁相互作用と強い相互作用を, 破線は原子核による吸収の効果を示している.

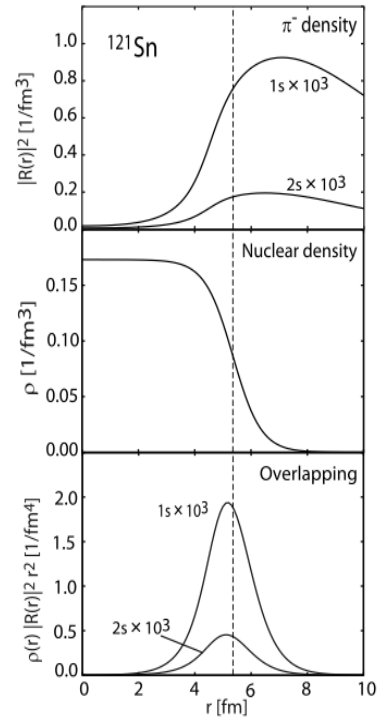


図 1.3: π 中間子と原子核の重なりと実効密度 [6]. 上から束縛 π 中間子, 原子核, 両者の重なり密度分布を表している. 破線は標準核密度の半分の地点を表す.

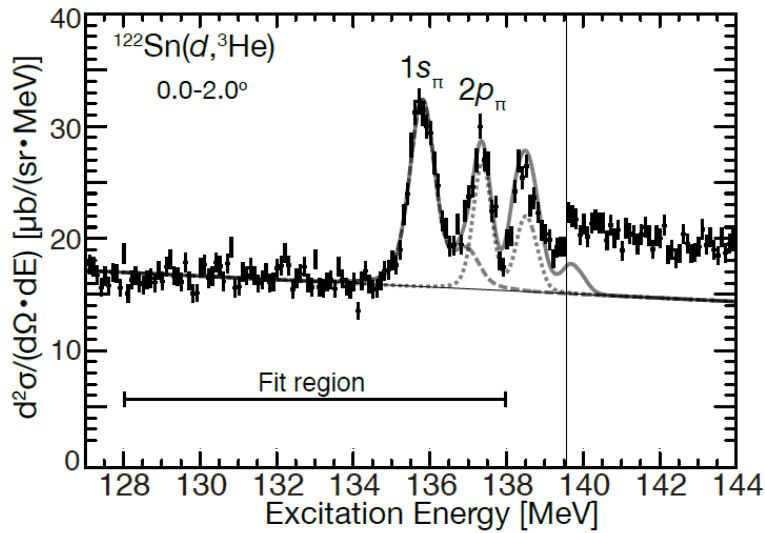


図 1.4: 2010 年に RIBF にて行われた実験で得られた π 中間子原子励起スペクトル [17]. ピークが左から 1s, 2p, その他の成分の複合の 3 つに分離された.

線とバックグラウンドを用いて $\chi^2 / \text{n.d.f} = 135.8/92$ でフィットできている. 2p 状態の右側に現れるピークは 2s, 3p, 3s からの寄与が合わさったものである. π 中間子原子 2p 状態は先述の通り, 強い相互作用によるエ

エネルギーシフトが小さいため、エネルギー較正の基準点として用いることができ、1s 状態と比較することにより、系統誤差が小さく抑えられる。しかし、統計精度が悪く、評価された b_1 パラメータの値は GSI での実験結果の 2 倍以上の誤差をもっていた。2014 年に同じく RIBF にてより高精度の測定を目指して行われた実験 [18] では、分散整合条件の改善により、 $^{121}\text{Sn}-\pi$ 中間子原子の測定により b_1 パラメータを

$$b_1(\rho_c) = -\left(0.114^{+0.0049}_{-0.0045}\right) \times m_\pi^{-1} \quad (1.9)$$

と、GSI よりも 30% 精度よく決定し、さらに $^{116}\text{Sn}-\pi$ 中間子原子についても系統的に測定された。

π 中間子原子分光による研究のその後の発展として、さらに実験精度を向上させ、次回はクォーク凝縮の密度依存性を評価することを目指す。実効密度 ρ_c は、同位体の中で質量数 A に着目することにより、有意な変化を見ることができると可能性が示されている [15]。これは直観的には、中性子数のみを変化させることで、斥力的な強い相互作用により π 中間子の原子核からの距離が変化し、それに伴い引力的な電磁相互作用の大きさも変化する二重の効果として理解できる。図 1.5 は、スズの質量数 $A=112-132$ を親核とする π 中間子原子 1s 状態について以下の 7 つのモデルにて計算した実効密度を表したものである。ウッズーサクソン型密度分布関数

$$\rho(r) = \rho_0 \left\{ 1 + \exp\left[\frac{r - R_N}{a_N}\right] \right\}^{-1} \quad \rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$$

の動径パラメータ R_N 、表面拡散パラメータ a_N に対し ($N = p, n$),

条件 1 安定核で経験的に知られている角度密度分布を使用。

$$R_p = R_n = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad a_p = a_n = 0.5 \text{ fm}$$

条件 2 陽子分布の動径パラメータを条件 1 の $A = 116$ に固定し、中性子分布の動径パラメータを中性子数でスケール。表面拡散パラメータは経験値を使用。

$$R_p = 1.18 \times 116^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad R_n = R_p \times \left(\frac{N}{66}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ fm} \quad a_p = a_n = 0.5 \text{ fm}$$

条件 3 動径パラメータは経験値を使用。表面拡散パラメータは [16] の平均二乗半径の実験値を再現するように決定。

$$R_p = R_n = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad a_p, a_n = \text{フィットパラメータ}$$

条件 4 動径パラメータは [16] の平均二乗半径の実験値を再現するように決定。表面拡散パラメータは経験値を使用。

$$R_p, R_n = \text{フィットパラメータ} \quad a_p = a_n = 0.5 \text{ fm}$$

条件 5 動径パラメータは $A = 116$ の値に固定。表面拡散パラメータは [16] の平均二乗半径の実験値を再現するように決定。

$$R_p = R_n = 1.18 \times 116^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad a_p, a_n = \text{フィットパラメータ}$$

条件 6 陽子分布は条件 4 の取り扱いで、中性子分布は条件 5 の取り扱いで計算。

$$R_n = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad a_p = 0.5 \text{ fm} \quad R_p, a_n = \text{フィットパラメータ}$$

条件 7 陽子分布は条件 5 の取り扱いで，中性子分布は条件 4 の取り扱いで計算．

$$R_p = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48 \text{ fm} \quad a_n = 0.5 \text{ fm} \quad R_n, a_p = \text{フィットパラメータ}$$

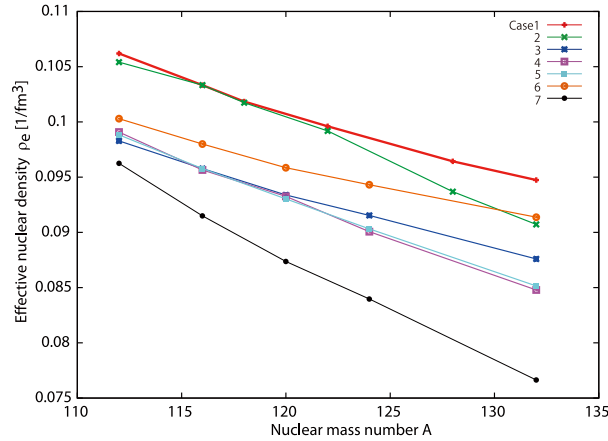


図 1.5: 実効密度の質量数による変化の計算結果 [15]．横軸は π 中間子原子の親スズ核の質量数，縦軸は対応する π 中間子原子がプローブする実効密度 ρ_e ．

本研究では $^{111}, ^{114}, ^{118}, ^{123}\text{Sn}-\pi$ 中間子原子状態について比較することにより，クォーク凝縮の実効密度依存性を評価することを目指す．スズの質量数の変化に伴う実効密度の変化は最大でも 10% と非常に局所的であるが，理論計算で約 110–120 keV と予想されている $2p$ 状態の幅 [19] を決定できる測定精度を実現させ，実効密度の変化をクォーク凝縮の変化として観測できるか否か確認する．表 1.1 は，先行研究のエネルギー分解能を決定していた主な原因とその寄与の内訳と，本研究で新たに開発する検出器とビームライン光学系により達成が見込まれる分解能を示している．先行研究からさらに標的厚を薄くすることで，標的上の反応地点の違い

表 1.1: 予想エネルギー分解能への主な寄与．

FWHM [keV]	先行研究 [18] (2014)	低圧 MWDC	+ 分散整合
標的厚	106	106	106
多重散乱	115	45	45
ビーム・光学系	145	145	85
合計	238	189	149

によるエネルギー損失の大きさを小さくし，系統誤差を抑制することができる．

1.2 RIBF における DGTGR, piAF 実験

1.2.1 概要

DGTGR, piAF 実験は RIBF にて計画されている．

DGTGR 実験は，重イオン二重荷電交換反応である $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}(0_2^+))$ 反応をプローブとして，二重ベータ崩壊の娘核中の二重 GT 共鳴状態を探索する．この反応の逆運動学である $^{12}\text{C}(^{18}\text{O}, ^{18}\text{Ne})^{12}\text{Be}$ 反応の入射エネルギー

ギー 80 MeV/u における 0° 方向の微分断面積が, 200 nb/sr と他の二重荷電交換反応と比べ 10 倍程度大きいことが 2011 年に大阪大学核物理研究センター (RCNP) における中性子過剰 ^{12}Be 核の構造研究の中で発見された [20]. これは $^{12}\text{Be}(0_{\text{g.s.}}^+)$ から $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ への遷移行列要素が大きいことを意味する. さらに $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ は 331 ns の長い寿命をもつ核異性体状態であるため, $^{12}\text{Be}(0_{\text{g.s.}}^+)$ へ崩壊する際に放出する電子・陽電子からの遅延ガンマ線を捉えることで識別できる.

標的には二重ベータ崩壊核の中から ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd を選ぶ. ^{48}Ca は, 二重ベータ崩壊核の中でも反応 Q 値が最も大きく $0\nu\beta\beta$ モードの候補として研究が進められている. また ^{48}Ca は, $Z=20$, $N=28$ の二重魔法数をもっており, 原子核構造の観点からも重要な研究対象となっている. さらに ^{48}Ca は, GT 遷移の娘核である ^{48}Sc について GT^- , GT^+ 遷移強度が既に詳細に調べられている原子核でもある. その他 $0\nu\beta\beta$ モード探索実験の対象として注目されている ^{76}Ge をはじめ, ^{48}Ca に比べ 2ν 核移行列要素と天然存在比が大きい ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd を用いる.

piAF 実験は, GSI での発見当初から π 中間子原子生成反応として手法が確立されている, $(d, ^3\text{He})$ 反応を用いる. この反応では入射重陽子が, 標的原子核から剥ぎ取った 1 個の中性子により π^- 中間子 1 個と陽子 1 個を生成し, π^- 中間子を原子核に移行して陽子を入射重陽子が運び去る, という反応である. π 中間子原子の軌道状態として最も深い 1s 状態を効率よく観測する上で, $(d, ^3\text{He})$ 反応を運動量移行, 角運動量移行が共に小さい無反跳条件で行うことが重要である. 入射重陽子ビームのエネルギーを 250 MeV/u に選ぶことにより無反跳条件が満たされ, 生成した π^- 中間子を原子核表面に小さな相対運動量で準安定的に, 小さな相対角運動量で深い軌道に束縛させることができる. 標的にはスズの安定同位体の中から $^{112}, ^{115}, ^{119}, ^{124}\text{Sn}$ を選び, π 中間子がプローブする実効密度を各標的で比べることにより, クォーク凝縮の密度依存性を評価することを目指す.

1.2.2 実験セットアップ

DGTGR 探索では $(^{12}\text{C}, ^{12}\text{Be}(0_2^+))$ 反応, piAF では $(d, ^3\text{He})$ 反応を質量欠損分光法により測定する. これらの反応により二重ガモフテラー遷移した原子核や π 中間子原子の励起エネルギーは, 反応で生成されたもう一方の射出粒子の運動量を測定することで求められる. RIBF における超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS をスペクトロメータとして利用することで, 射出粒子の運動量解析を行う. 質量欠損分光実験のセットアップを図 1.6 に示す. BigRIPS は 8 つの焦点面から構成されるビームラインで, 標的位置焦点面 F0 から F1, F2,

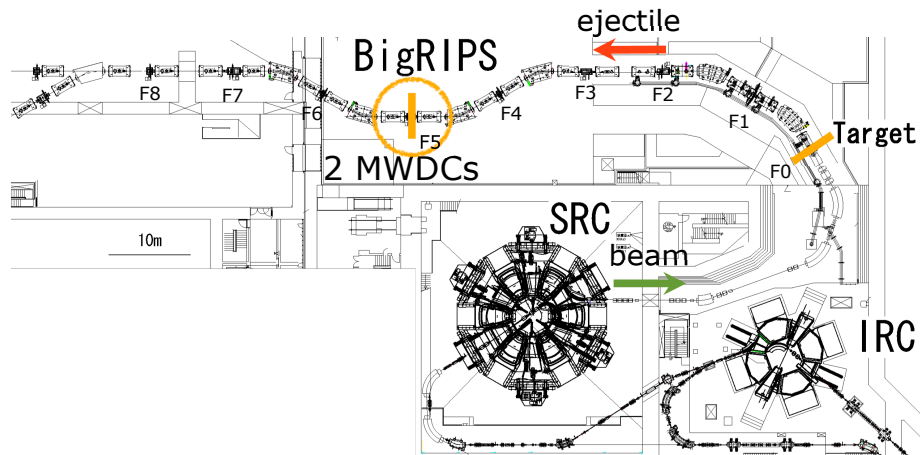


図 1.6: RIBF における質量欠損実験セットアップ. SRC から供給されるビームにより F0 で生成された粒子を BigRIPS を用いて選別し, F5 に配置した 2 台の MWDC で飛跡を再構成することで粒子の運動量を測定する.

..., F7 と順に 77 m にわたり並んでいる。各焦点面の間には、双極磁石が超伝導三連四重極磁石に挟まれる形で配置され、ビーム軌道を曲げることによる粒子の運動量選別とビームの収束が行われる。

超伝導リングサイクロトロン SRC から供給されるビームは F0 へ照射され、標的との反応で粒子が射出される。DGTGR の場合、200 MeV/u にまで加速された ^{12}C ビームを 1000 pA のビーム強度で 20 mg/cm^2 の質量厚を持つ二重ベータ崩壊核標的へ照射する。ビーム強度は目的の $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ とは別の反応で生成される t の F3 における強度で制限される。標的厚は反応生成率と分解能の兼ね合いで決定される。標的厚を厚くするほど反応生成率は良くなるが、今回の荷電交換反応の場合、標的上の反応点の違いが ^{12}C と ^{12}Be によるエネルギー損失の差として 2 MeV 程度エネルギー分解能を悪化させる。piAF の場合、先行研究 [18] では 250 MeV/u にまで加速されたビーム強度 200 pA の d ビームを 12.5 mg/cm^2 のスズ標的へ照射した。標的厚は DGTGR と同様に反応生成率とエネルギー分解能の観点から決定されるが、ビーム強度は今後の開発によってはさらに上げることができる。

その後粒子は、BigRIPS により磁氣的に運動量解析されながら下流へと進む。このとき、磁場 B の中を特殊相対論的運動量 $Am_u v\gamma$ で運動する原子核は、

$$B\rho = \frac{A}{Z} m_u v\gamma \quad (1.10)$$

で表される磁気剛性が等しい場合、同じ曲率半径をもつ軌道を描くため、選別されない。DATGR の場合、ビームである ^{12}C や標的原子核が破砕することで生じた t , ^6He , ^9Li が、piAF の場合、入射 d 粒子が標的上で破砕することにより生じた p がバックグラウンド粒子として測定したい ^{12}Be や ^3He と共に BigRIPS 下流にまで到達する。表 1.2 に両実験における測定粒子とその下で想定されるバックグラウンドの状況をまとめる。これら

表 1.2: DGTGR, piAF 実験で測定する粒子とバックグラウンド。

	DGTGR	piAF
ビーム	$^{12}\text{C} \sim 10^{13} \text{ Hz}$	$d \sim 10^{12} \text{ Hz}$
標的	^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd	112 , 115 , 119 , ^{124}Sn
測定粒子	$^{12}\text{Be}(0_2^+) \sim 30 \text{ Hz}$	$^3\text{He} \sim 10^2 \text{ Hz}$
バックグラウンド	$t \sim 10^7$, $^6\text{He} \sim 10^5$, $^9\text{Li} \sim 10^5 \text{ Hz}$	$p \sim 10^5 \text{ Hz}$

の粒子は、運動量分散焦点面 F5 まで到達する。運動量分散焦点面とは、ビームの中心軌道に対応する磁気剛性からのずれが焦点面上の位置と相関を持つ焦点面のことである。運動量分散焦点面上での粒子の飛来位置を測定することにより、その粒子の運動量を求めることができる。アクセプタンスは磁気剛性のずれ $\pm 2.0\%$ 、水平方向 $\pm 25 \text{ mrad}$ 、鉛直方向 $\pm 40 \text{ mrad}$ である。両実験では F5 焦点面に飛跡検出器を配置し、粒子の運動量再構成を行うが、測定対象としている粒子が軽イオンであること、また表 1.2 に示したように、この飛跡検出器は高レートなバックグラウンド条件下での測定に耐える仕様になっていなければならないことから、BigRIPS で標準的に使用される平行平板型雪崩計数管 PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter)[23] よりも軽イオンに対するガス増幅率が大きく、電離した陽イオンの電荷分布の空間的拡がりを抑制できる多芯式ドリフトチェンバーを用いることとした。

目的の粒子とバックグラウンド粒子の識別方法については、両実験で異なっている。DGTGR の場合、まず F5 の MWDC の下流側に 8 mm 厚の銅板を設置し、エネルギー損失により ^{12}Be とバックグラウンドの軽イオンのうちの主に ^6He と t を BigRIPS の運動量アクセプタンスから取り除く。そして F8 に配置する MINOS と DALI2 システムを用いて、図 1.7 のように $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ からの遅延ガンマ線を検出することにより二重 GT

反応を識別する．MINOS は液体水素標的システムで，DGTGR 実験では ^{12}Be のストッパーとして用いる．

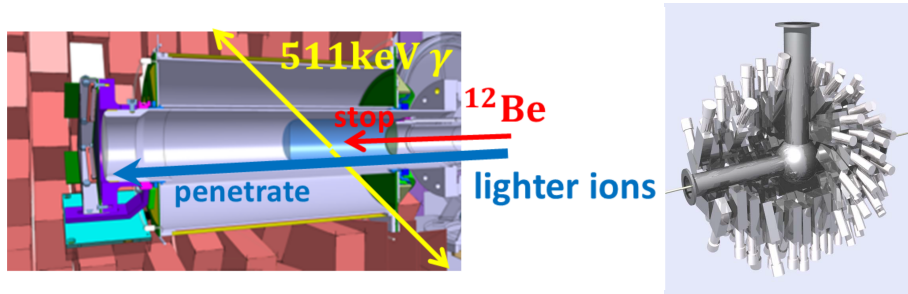


図 1.7: 液体水素標的 MINOS(左) と NaI シンチレータ群 DALI2(右)．DGTGR 実験において MINOS は ^{12}Be ストッパーとして，DALI2 は遅延ガンマ線検出器として F8 に配置し， $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ 識別に用いられる．

MINOS 上流に 16 mm 厚の銅板を設置し， ^{12}Be がちょうど MINOS の 150 mm 水素標的の中央で止まるように設計する．停止した核異性体状態の $^{12}\text{Be}(0_2^+)$ は，331 ns の寿命で $^{12}\text{Be}(0_{g.s.}^+)$ へと脱励起する．その際にそれぞれ反対方向に放出される電子と陽電子に起因する 511 keV のガンマ線 2 本を，MINOS の周囲を覆う 160 個の $4.5 \times 8 \times 16 \text{ cm}^3$ の大きさを持つ NaI シンチレーションカウンターで構成される DALI2 システムを用いて検出する．2 本のガンマ線を同時に検出する効率はアクセプタンスから約 30% と見積もられる．その他のバックグラウンド軽イオンは MINOS 中で停止することなく貫通し，下流の veto カウンターにヒットしてトリガーから取り除かれる．piAF の場合，F5 と F7 にプラスチックシンチレータを設置し， ^3He と p でこれらの区間を通過するのにかかる時間 TOF (time of flight) が異なることを利用する．先行研究 [18] ではこの手法により， ^3He と識別された事象における陽子の混入率は 0.1% 未満であった．

トリガー条件は，DGTGR の場合，F8 の最上流に設置する 2 つの 15 mm 厚プラスチックシンチレータからの信号の同時計数かつ veto カウンターの信号の反同時計数を用いる．電荷 $Z = 1, 2, 3$ と $Z = 4$ のイオンによるシンチレータからの信号をディスクリミネータにより弁別することにより，トリガーレートを約 1 kHz に抑える．piAF の場合，F5 と F7 のシンチレータからの信号の同時計数で作成する．このタイムウィンドウの設定により，例えば ^3He とサイクロトロン半周期分 (20–30 ns) だけずれた陽子がトリガー生成信号に混ざるため，予想されるトリガーレートは 0.1–1 kHz である．

1.3 データ収集システム更新の動機

想定されるトリガーレートに対して十分に不感時間が小さく，かつビームライン飛跡検出器や粒子識別検出器等の RIBF の既存検出器系とイベント同期した DAQ システムを構築することが本研究の目標である．前節のように，両実験は要求される高統計，高分解能測定という課題に対して，RIBF の SRC 大強度ビームと BigRIPS 分散整合ビームラインを活用するという共通点をもっている．

両実験で統計精度を上げるには，大強度ビームにおいてもデータ収集を律速しない DAQ システムの準備が課題となる．2014 年 5 月に行われた piAF の先行研究の実験では，典型的に約 400 Hz のトリガーリクエストに対し，約 $420 \mu\text{s}$ の不感時間で読み出した結果，DAQ ライブレートは約 85% となっていた．その最大の律速要因が MWDC 読み出し処理系で，全不感時間の 40% にあたる約 $170 \mu\text{s}$ を占めていた．さらに，今後の加速器やイオン源の開発状況によっては，ビーム強度をさらに数倍程度上げられる可能性があり，加速器の性能に対応した DAQ システムの開発が必要となった．この課題を克服するために MWDC 読み出し系を更新し，不感時間を分散，削減するための開発を行った．

両実験では分光分解能を向上させるために分散整合法というイオン光学系の手法を用いる．分散整合法と

は、標的位置焦点面 F0 前後でのビームラインの分散を合わせることで、1 次ビームの焦点面上での運動量拡がりの効果を抑制し、分光分解能を改善する手法である。分散整合イオン光学系の調整手順は以下の通りである。まず標的上流のビームラインに理論計算で求められた光学パラメータを設定し、各焦点面において PPAC を用いてビームの収束状態を作る。次に F5 に配置した MWDC のトラッキングにより導き出された粒子の飛跡を標的位置まで外挿し、標的位置での運動量分散を推定する。この一連の作業を、F0 での運動量拡がりが F5 に到達する粒子の位置に十分寄与しなくなるまで繰り返す。以上のビーム光学系や検出器の調整は、オンラインで取得したデータを解析し、その結果を基に行う。さらに両実験は、複数の標的を用いることにより、二重 GT 遷移と π 中間子原子について系統的に測定を行う。そのためには、実験の立ち上げ時に光学系や検出器を素早く整備し、本測定のための準備時間をなるべく短くする態勢が必要である。今回、新規 MWDC 読み出し系を RIBF の既存 DAQ システムに組み込むことにより、既存検出器系と共にデータのイベント構築を高効率で行い、オンライン解析までの作業を統一させるための開発を行った。

本論文では、一体型読み出しボードを RIBF 汎用 DAQ システムに導入し、高速化とイベント同期を実現するために行った開発と性能評価について述べる。2 章では使用したモジュールについて説明した上で、3 章に DAQ システムを構築して行った基本性能評価の結果を述べる。また東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) における陽子ビームを用いた新規 MWDC のテスト実験に本 DAQ システムを初めて採用した。そのテスト実験で評価した DAQ システムの健全性に関する議論を 4 章に記す。最後に 5 章ではまとめと今後の展望について述べることとする。

第 2 章

データ収集システム

この章では、MWDC 読み出しの高速化を目的とし導入した電子回路ボード、および MWDC 読み出し系が、既存検出器系の読み出し系として標準的に使用されている VME モジュールとイベント同期した DAQ システムを構築するために使用したハードウェアとソフトウェアについて解説する。以下に新たに開発した DAQ システムの構成要素をまとめる。

1. RAINER (REPIC ASD Integrated Electronic Readout) :

ワイヤーチェンバー読み出し用 TDC [25]

2. STM (Sub Trigger Module) :

トリガータグ分配モジュール [31]

3. VME-RM (VME Receiver Module) :

トリガータグ受信 VME モジュール [32]

4. GTO (General Trigger Operator) :

RIBF 汎用トリガーコントローラ [33]

5. babirl :

RIBF 汎用 DAQ ソフトウェアパッケージ [34]

2.1 従前の DAQ

先行研究では、MWDC からのアナログ信号を Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) でデジタル化した後、VME インターフェースの 64 チャンネルマルチヒット TDC64ch AMT-TDC-VME [27] を用いてリーディングエッジとトレーリングエッジを読み出ししていた。この 64ch AMT-TDC-VME12 台を F5 シンチレータ用のマルチヒット TDC の V1290/CAEN1 台とマルチイベント QDC の V792/CAEN2 台、スケーラの RPV100/REPIC1 台を合わせて同一の VME バスにて 1 イベント毎に順次読み出した結果、全体で 420 μ s の不感時間が発生し、そのうちの 170 μ s を MWDC の読み出しに費やしていた。図 2.1 は、各 VME モジュールの読み出し終了時にインターラプト・I/O レジスタの RPV130/REPIC を用いてパルス出力させた様子をオシロスコープで確認した記録である。先行研究における平均約 200 Hz、最大約 1 kHz のトリガーレートに対し、実際のデータ取得率は約 85% であった。^{*1}DGTGR, piAF 実験では、限られたビームタイムの中で複数の標的について十分な統計精度の測定を行わなければならないことから、データ取得率を向上させるため、この不感時間を削減することが課題となる。そのために今回、MWDC 読み出し系の更新を行った。

^{*1} RIBF で供給されるビームは、サイクロトロン起因の 13.3 MHz のバンチ構造をもつ。そのため TOF ウィンドウやトリガーのスレッシュホルドの条件、また加速器本体側の条件によりトリガー数は数倍程度変化する。

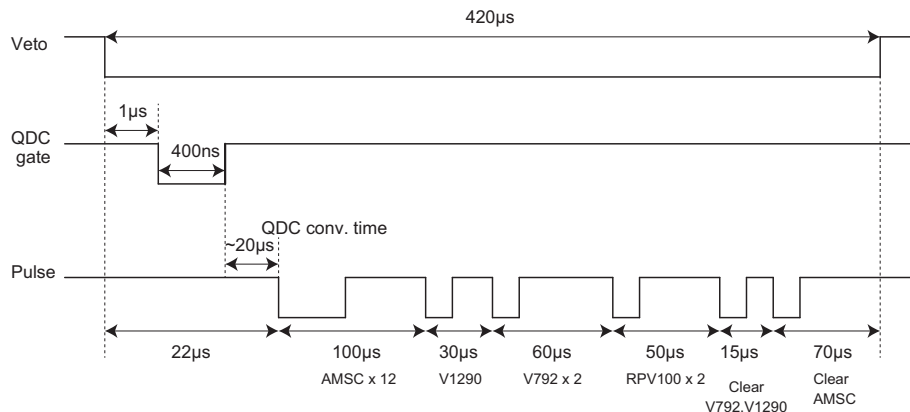


図 2.1: 各 VME モジュールの読み出しに要した時間. トラッキング用の MWDC と粒子識別, スタートカウンター用のプラスチックシンチレータの信号を同一の VME バスで読み出した結果, 全不感時間約 $420\mu\text{s}$ のうちそれぞれが約 $170\mu\text{s}$, $110\mu\text{s}$ を占めていた.

2.2 新規 MWDC 読み出し用 TDC

本研究では, MWDC 読み出し系として本研究室で既に性能評価された [24], 64ch RAINER ボードおよびトリガータグ分配モジュールを用いた. 本ボードは, Belle-II 実験の CDC 読み出し用の回路として開発されていた読み出しボード [26] に他の実験で利用可能な汎用性を持たせ, さらに上記のトリガータグ受信機能を追加した改良型である.

2.2.1 64ch RAINER

64ch RAINER (64ch REPIC ASD Integrated Electronic Readout) は, REPIC と KEK エレクトロニクスシステムグループとが共同で開発した, ワイヤチェーン用多チャンネルマルチヒット TDC ボードである. 1 台で 64 チャンネル分の MWDC からのアナログ信号を Amplifier-Shaper-Discriminator (ASD) で増幅, 波形整形, デジタル化した後, FADC (AD9212) で波形サンプリング, TDC で時間計測した情報を TCP/IP 通信にて行う一体型ボードとなっている. デジタル信号処理およびデータ転送は全てボードに実装されている FPGA (Field Programmable Gate Array) (Kintex-7) によって行われる. 64ch RAINER ボードの FPGA ファームウェアには, Belle-II 実験の CDC 読み出し用ファームウェアを基に汎用性をもたせ, 改良したものを用いた. データ転送には, 読み出し回路と PC のイーサネットによる接続を FPGA 上で実現させる SiTCP [28, 29] ネットワークプロセッサを使用した. また, トリガータグ分配モジュールである STM (Sub Trigger Module) との接続により, イベント番号とスピン番号の情報を受信し, 転送ビジー信号を送信することが可能である. 64ch RAINER ボードの外観を図 2.2, 仕様を表 2.1, 信号, 命令処理のブロックダイアグラムを図 2.3 に示す. 64ch RAINER ボード内での信号の変換, 数値化, 記録, 転送の処理は以下の順で行われる.

- ① MWDC からのアナログ信号は ASD チップへと入力される.
- ② ASD で増幅, 波形整形されたアナログ信号は FADC チップへと入力される.
- ③ ASD ではアナログ出力波高がスレッシュホールドを越えたタイミングでデジタル信号に変換され, TDC へ入力される.
- ④ TDC ではトリガー入力時刻がコモンストップモードで記録される.

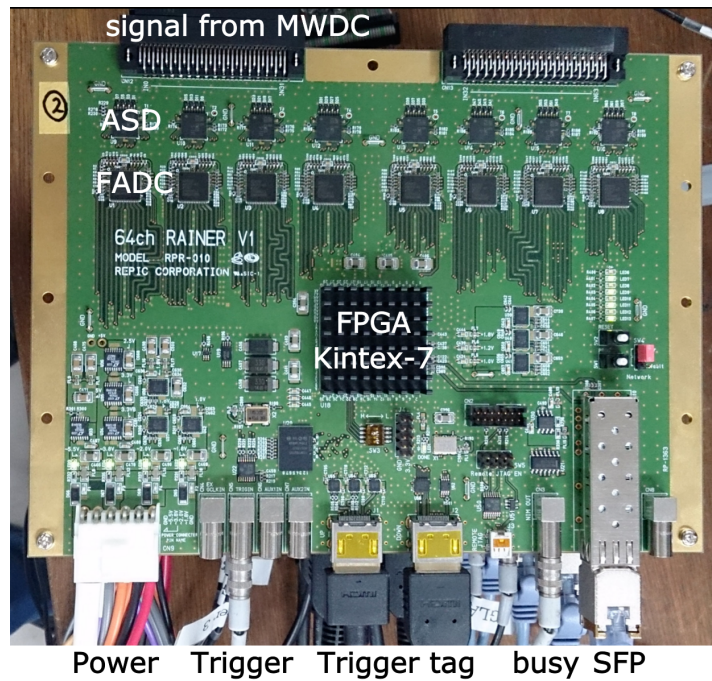


図 2.2: 64ch RAINER ボード外観. ASD, FADC, FPGA が実装されており，検出器からのアナログ信号の波形，タイミング情報を数値化，記録，転送する．

表 2.1: 64ch RAINER ボード仕様．

機能	仕様
FADC	解像度 10 ビット 取り込み周期 32 ns サンプリング周波数 31.25 MHz
TDC	分解能 1 ns
TOT	32 ns / 1 LSB
リングバッファ	トリガー遅延 < 8128 ns
マルチトリガー	連続 15 トリガーまで
イベントタグ受信	イベント番号 12 ビット, スピル番号 8 ビット
イーサネット通信	SiTCP [28, 29]

- ⑤ FADC でサンプルされた波高情報および MWDC ヒットとトリガー入力時刻，トリガータグの情報はリングバッファに蓄積され， $8\mu\text{s}$ おきに更新される．
- ⑥ ASD のスレッシュホールドや FADC のペDESTAL，データ出力する信号とトリガーの時間間隔は，SiTCP に UDP パケットを送信することで遠隔バス制御できる．
- ⑦ データ出力区間に入ったデータは転送バッファにイベント毎のデータ形式で記録，蓄積される．
- ⑧ 作成されたデータは SiTCP プロセッサへと入力され，TCP/IP プロトコルにてギガビット・イーサネット経由で PC へ送信される．

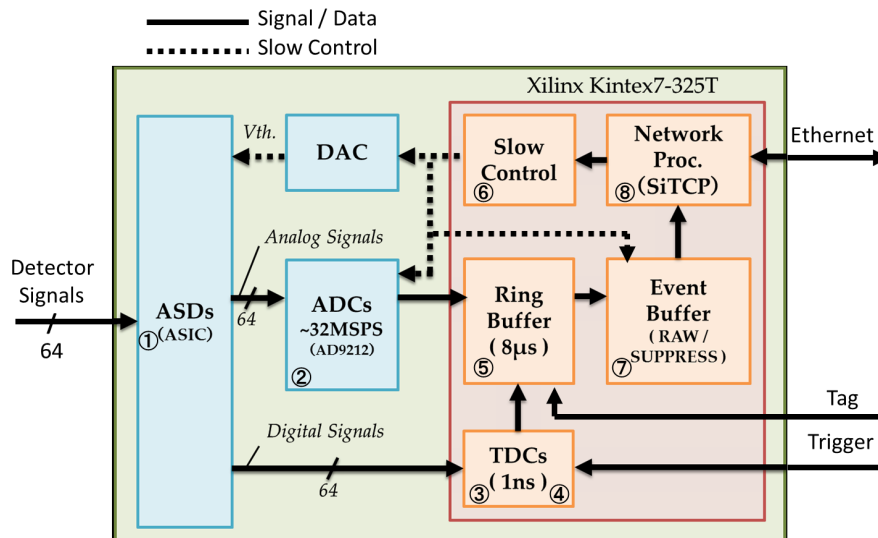


図 2.3: 64ch RAINER ボード信号, 命令処理ダイアグラム [25]. 検出器からのアナログ信号は ASD, FADC でデジタル化され, 波形情報とタイミング情報がバッファリングされた後, PC ヘイサネットを通じて転送される. DAQ 制御, 読み出し条件の設定は PC から行う.

64ch RAINER には読み出し速度を重視した機能が2つ搭載されている. データ出力形式としては, FADC のデータをすべて記録する RAW データモードと, TDC のヒットが存在するチャンネルについてのみ ADC の和と TOT (time over threshold), TDC を記録することでデータサイズを抑制した SUPPRESS モードの2通りを選択することができる. RAW モードでは TDC 時間情報を12 ヒットまで記録できるのに対し, SUPPRESS モードでは2 ヒット目までの時間情報を数値化し, 3 ヒット目以降についてはヒットの有無のみを記録する. データ転送方式としては, Nagle アルゴリズム [30] という, 小さなデータを結合させることによって転送オーバーヘッドを低減し, ネットワークとアプリケーションの処理効率を向上させるためのアルゴリズムを利用できる. 図 2.4 上側に Nagle アルゴリズムを使用しない場合に考えられる「小さなデータ問題」を, 下側に Nagle アルゴリズムによる転送バッファリングを模式的に表す. いかなるデータ容量の通信パケットに対して

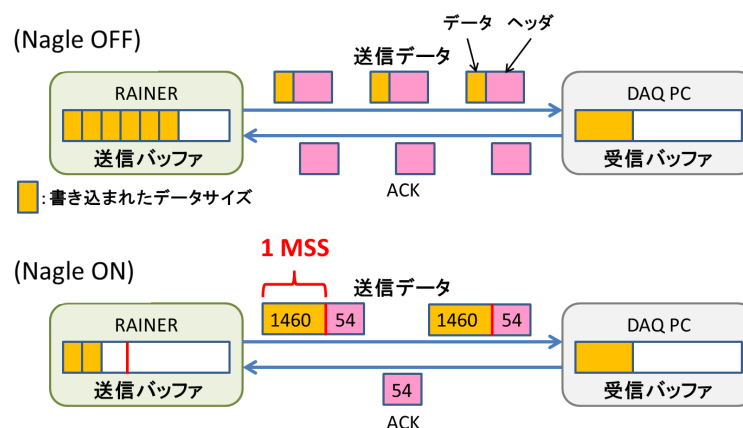


図 2.4: Nagle アルゴリズムによるデータ転送の効率化. 図上側は Nagle アルゴリズムを使用しない場合に考えられる, 転送オーバーヘッド状態を表す. 下側は Nagle アルゴリズムにより行われるブロック転送を表す.

も、TCP/IP プロトコルで転送する際には、データ容量やシリアル番号、バッファの空き容量などを通信相手に伝えるための一定のオーバーヘッド (今回の場合 54 バイト) がある。図 2.4 上側のように、1 つのパケットに含まれるデータの割合が小さいパケットがネットワークに大量に送信された場合、ネットワーク回線の帯域圧迫や受信側の処理効率の低下を招き、データ通信の処理遅延や実行不能といった事態に陥る可能性がある。Nagle アルゴリズムは小さなデータ送信を抑制するために、最大セグメント長 [MSS: Maximum Segment Size (SiTCP 標準値で 1460 バイト)] を定め、次の送信呼び出しに対して未だ確認応答を受信していない送信済みセグメントがある場合には、1 MSS 未満のデータ容量のパケットを送信しないように取り決められている。そうすることで 1 つのコネクションに対して 1 つまでしか 1 MSS 未満のパケットが送信されないことになり、データ通信処理の負荷を削減することができる。なお、SiTCP プロセッサには約 32 kB の容量の転送バッファが用意されており、この転送バッファに蓄積されたデータ容量が約 30 kB を超えない限り、64ch RAINER ボードはデータを記録、送信することができる。転送バッファのデータ容量がこの許容範囲を超えている間は、イベント構築されたデータは転送バッファに書き込まれることなく破棄され、64ch RAINER ボードの NIM 出力および HDMI コネクタ経由のシリアル転送によりビジー信号が外部に出力される。しかし、64ch RAINER ボード中で記録されているトリガーカウンターのインクリメントはこの不感時間に関係なく行われるため、取得したデータのトリガー番号の欠損の有無を確認することでイベントデータの取り逃しを発見できる。

2.3 トリガータグ分配・受信モジュール

今回の開発における目標の 1 つは、複数の読み出し系を RIBF 汎用 DAQ ソフトウェア上でフロントエンド毎に並列に読み出し、不感時間を分散、縮小することである。この目標を達成するために 64ch RAINER ボードを RIBF で開発されたネットワーク分散型 DAQ システム [34] に組み込む開発を行った。しかし、この並列読み出しは同時に、各フロントエンドからのデータ転送が非同期になってしまうことを意味する。各フロントエンドがそれぞれ独立にデータ構築を行った場合、データ取得中にイベントを取り逃した計算機が 1 台でも存在すると、どのイベントで取り逃しが発生したのかが判らない限り、全体のイベント照合が取れず、そのデータファイルの価値が失われてしまう。J-PARC のハドロン実験ではこの問題を防ぐため、トリガータグ分配・受信モジュールが既に開発されており、J-PARC ハドロン実験用トリガー分配システム [31] の構成要素として完成している。64ch RAINER ボードもこの規格に準拠しトリガータグ受信機能を備えている。このトリガー分配システムを RIBF の汎用 DAQ システムにも導入することにより、今回の開発のもう 1 つの目標である、既存検出器の読み出し系とイベント同期した DAQ システムの構築が実現できる。

2.3.1 STM (Sub Trigger Module)

STM (Sub Trigger Module (図 2.5)) は、64ch RAINER ボード専用開発されたトリガータグ分配モジュールである。J-PARC の DAQ システムにおけるトリガー分配マスターモジュールである Master Trigger Module (MTM) の中継、分散用スレーブとしての役割をもち、64ch RAINER ボードと次節で紹介する Receiver Module (RM) に対してはマスターとして機能することもできる。外部回路で作成された NIM 信号をイベント番号、ス



図 2.5: Sub Trigger Module.

ビル番号としてそれぞれ 12 ビットと 8 ビットで計数し、これらのトリガータグ情報を、64ch RAINER ボードへは HDMI コネクタ 1 系統経由で最大 4 台分、RM へは RJ45 コネクタ 2 系統経由で最大 2 台分シリアル通信にて送信する。64ch RAINER ボードはまた、受信したトリガータグ情報をデジタイゼーション接続した後段ボードへ、自身の転送バッファの空き具合を示すビジー信号を前段ボードまたは STM へと送信する機能を持ち、STM より後段のモジュール間で veto を共有することができる。

2.3.2 VME-RM (VME Receiver Module)

VME-RM (VME Receiver Module) (図 2.6) は、J-PARC K1.8 ビームラインにおける実験におけるネットワーク分散型 DAQ システムのトリガータグ分配システムとして、開発された一連のモジュール群の 1 つである。VME-RM は、VME GPIO ボード GNV-251/GND にサブユニットとしてメザニンボード GNV-490/GND を装着し、GPIO ボードの CPLD と FPGA に VME-RM 用ファームウェアを実装することで、MTM または STM から送信されるトリガータグ情報を VME 側のインターフェースモジュールとして受信し、またビジー信号を MTM や STM に送信する機能を実現させている。イベント番号、スピル番号は 64ch RAINER ボードと同じくそれぞれ 12 ビット、8 ビットで記録される。

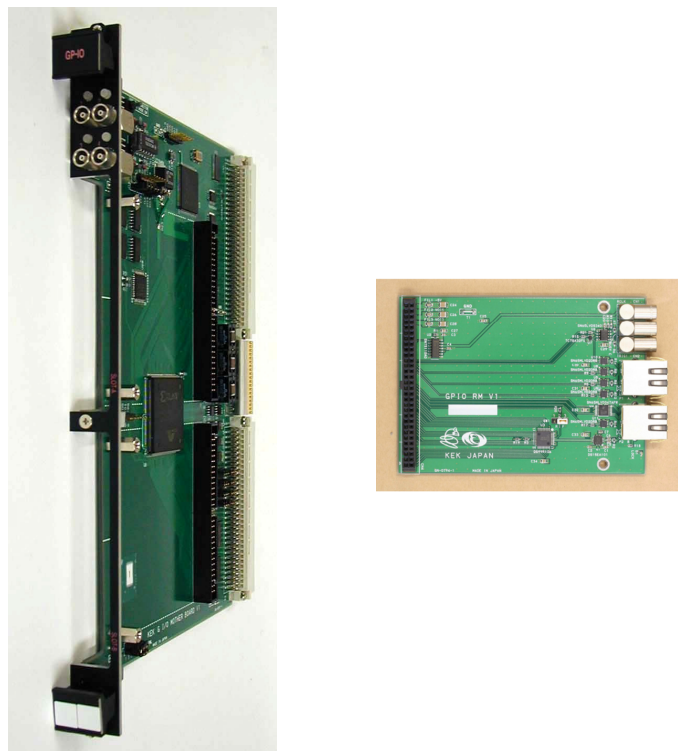


図 2.6: VME GPIO ボード (左) と VME メザニンボード (右).

2.4 RIBF 汎用 DAQ システム

計画している実験では、BigRIPS を分散整合ビームラインとして用い、高精度な質量欠損分光を行う。分散整合ビームラインを構築する上で、BigRIPS には高いビーム位相の安定性が求められる。実験ではビームの軌道と運動量を測定し、電磁石のパラメータの変更によって SRC 由来のビームの運動量不定性を打ち消す。欠

損質量エネルギー分解能の向上を目的としたこの分散整合イオン光学系を BigRIPS ビームラインに適用するために、ビーム位置モニターとして平行平板型雪崩計数管 PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter) を BigRIPS の各焦点面に配置する。ビームの状態を正確に把握するには、各焦点面でのビームの飛来位置を確実に捉えることが不可欠である。つまり全ての検出器についてイベント同期したデータを記録できる DAQ システムが必要である。また詳細なビーム軌道の解析を簡便に行えるよう、PPAC については既に DAQ とオンライン解析のシステムが固定されている。PPAC と MWDC のデータの相関をオンライン解析で可視化するためには、全検出器のデータが汎用的なデータフォーマットに格納されていることが望まれる。

今回、MWDC 読み出し系として新たなフロントエンドモジュール 64ch RAINER を導入した。この更新に伴い、64ch RAINER ボードを RIBF 汎用 DAQ ソフトウェア [34] へ組み込むための DAQ ミドルウェア開発が必要となった。PPAC 読み出し系に VME-RM を追加することにより、MWDC とのデータのイベント同期を保証できる。

2.4.1 DAQ ソフトウェア babirl

RIBF では効率的な DAQ を行うため、ネットワーク分散型 DAQ システムが開発され、RIBF が稼働し始めた当初から標準的に使用されている。babirl は RIBF 汎用 DAQ システムのソフトウェアパッケージである。開発理念は主に、汎用性と将来に向けた高速化である。RIBF では近年、検出器の新たな導入や大型化に伴いモジュールが読み出す信号の多チャンネル化が進んでいる。これら複数の検出器からの膨大な数の信号を管理しながら安定的に実験を実施する上で、検出器毎に DAQ と解析のルーチンが固定されていることは、非常に重要である。データの収集やイベント構築の処理を検出器毎に分けられた各ノードに行わせることにより、各ユニットの処理が簡素化し、開発やメンテナンスが容易になる。同時に、システム全体として処理負担が軽減するため、高速化が期待できる。さらにモジュール毎に並列読み出すことで、読み出しモジュールに付随する典型的に 50–100 μ s に及ぶ不感時間を分散させることができる。また、babirl はイベント同期型データ収集ソフトウェアである。システム内部で管理するイベント番号で厳格に各モジュールからのデータをイベント構築することで、最終的に 1 つに統合されるデータの中で各検出器のデータを照合することができる。

図 2.7 に RIBF 汎用 DAQ システムの構成を示す。図の各箱が機能毎に分散されたコンピュータノードを表す。点線で囲った部分が 1 つの検出器群に対して固定された DAQ のユニットを示す。実験毎に異なる検出器群の組み合わせを使用するが、DAQ システム上で用いるユニットの選択を行うだけで柔軟に各実験のセットアップに適応できる。また、ユニット単位での開発やテストも既存システムに影響を与えることなく容易に行える。それぞれのユニット内では、CAMAC や VME などのコントローラ単位で並列にデータの読み出しを行い、不感時間を分散させることができる。各ユニット毎に取得したデータのイベント構築を行い、ユニット毎のデータパッケージを作成した後に全体でのイベント構築を行うため、オンライン解析においても検出器群の切り替えや、ユニット内外での相関を容易に調べることができる。さらにイベント構築マスターは、イーサネットを通じてスケーラや磁場パラメータ、検出器供給電圧値などビーム起因ではない情報もタイムスタンプを基にデータとして記録することができる。

babirl DAQ システムは主にイベント構築プロセッサである babild とイベント送信プロセッサである babies によって構成される。図 2.8 に RIBF 汎用 DAQ ソフトウェア babirl の構成を示す。このイベントデータの送受信は、DAQ コントローラである babicon によって制御される。64ch RAINER ボードの導入により新たに開発した部分を色塗りで示す。標準的に使用される CAMAC や VME のコントローラは CPU が内蔵されており、そこに実装された DAQ ドライバーがバスで接続されたモジュールのデータをイベント毎に読み出し、PC へ転送する。64ch RAINER ボードはイーサネット経由で接続した先の PC からソケットプログラミングによってデータの送信を要求しなければならない。そのため、イベント送信プロセッサ babies のライブラリ

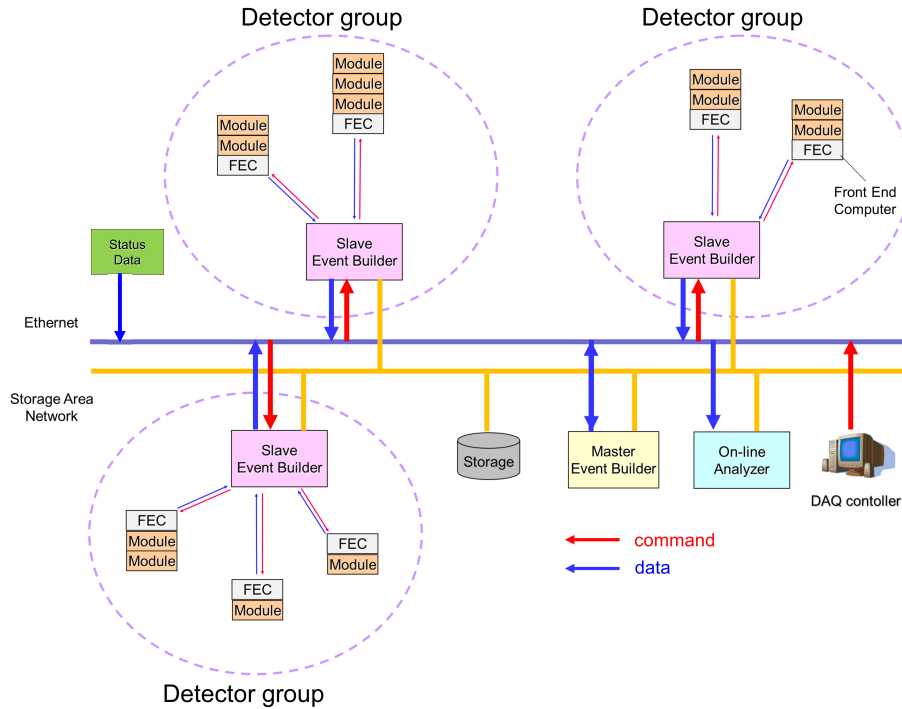


図 2.7: RIBF DAQ システムの構成. 検出器群毎にイベント構築のユニットを形成するネットワーク分散型システムとして構築されている。

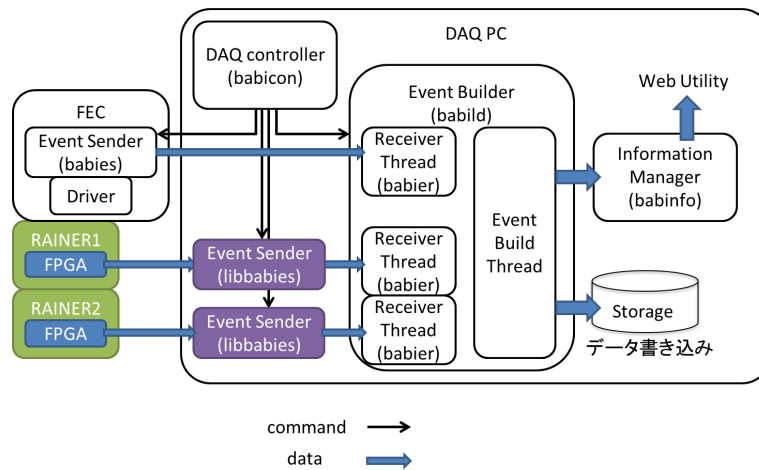


図 2.8: babirl によるデータフロー図. 色塗りにしている部分が 64ch RAINER ボードの新規導入に伴い開発した DAQ ミドルウェアを表す. libbabies により 64ch RAINER との通信接続から、データを受信したバッファから 1 イベントずつデータを区切って babild へ転送するまでの処理を行う。

libbabies を用いた読み出しコードの開発を行った. 図 2.9 に babirl による DAQ のタイミング図を示す。

- ① GTO はリクエストトリガーに対し veto を掛けている。
- ② babicon により開始要求が babild に掛けられる。
- ③ babild が開始待機状態になると各 babies へ順次開始要求が掛けられる。

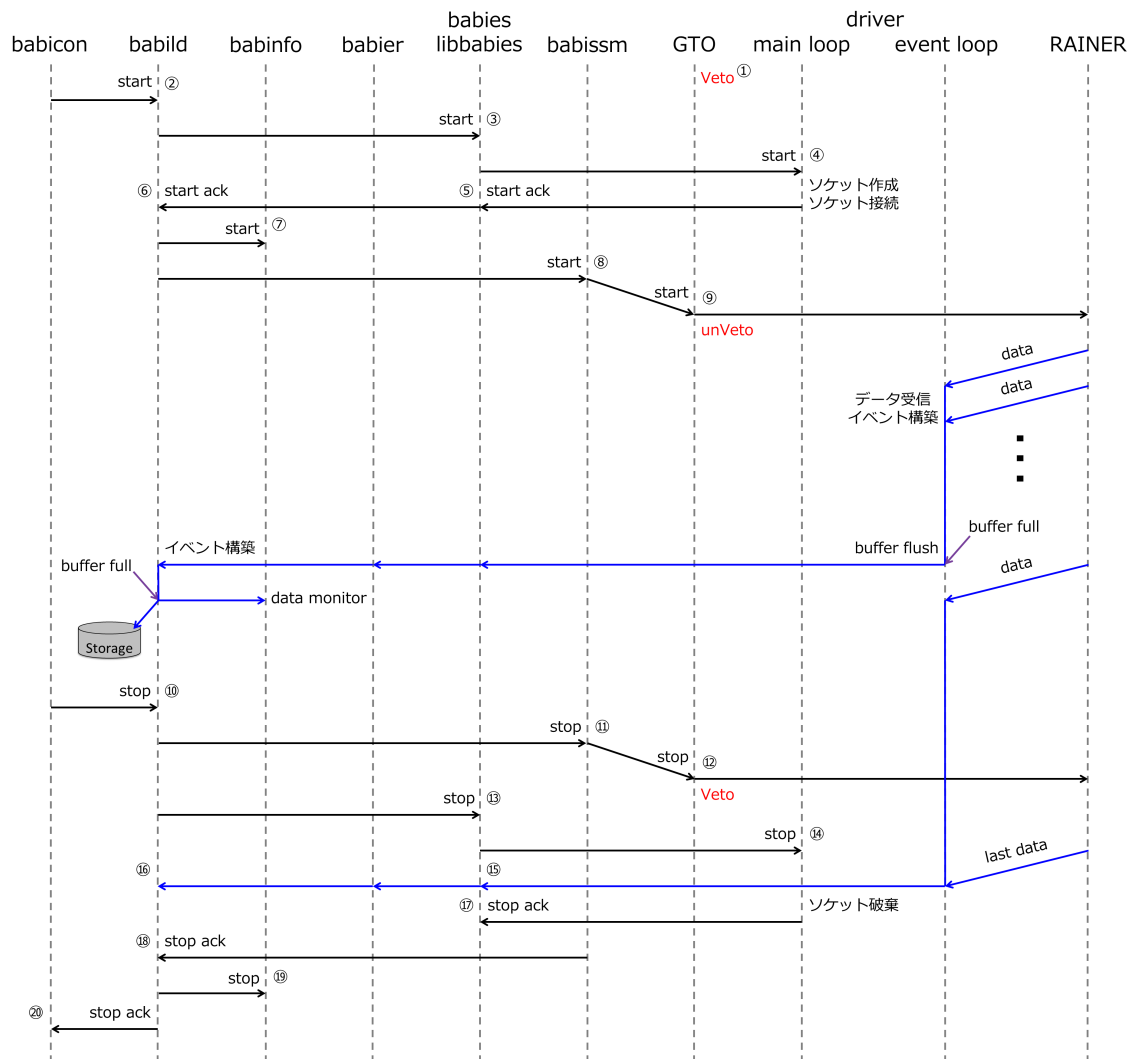


図 2.9: babirl によるデータフロー図. DAQ コントローラからの DAQ 制御命令が順次イベント送信・構築プロセスへと伝えられ, データ収集が行われる.

- ④ 各 babies が読み出しプログラムを実行する。各 64ch RAINER ボードはサーバー PC とソケットを作成し、通信接続を行う。
- ⑤ 各読み出しプログラムの DAQ 準備が完了すると開始確認応答が各 babies へと返される。各 64ch RAINER ボードについてはソケット通信が確立されたことを示す。
- ⑥ 各 babies が babild へ開始確認応答を返す。
- ⑦ babild が全ての babies からの開始確認応答を受信すると、babild は開始要求を babinfo に掛け、babinfo が各種 DAQ RUN 情報の記録, 表示を開始する。
- ⑧ babild が DAQ 開始/終了コントローラである babissm へ開始要求を掛ける。
- ⑨ babissm が veto を解除し、トリガーが発行され、DAQ が開始する。
- ⑩ babicon により終了要求が babild に掛けられる。
- ⑪ babild が babissm へ終了要求を掛ける。
- ⑫ babissm が veto を設定し、トリガーが破棄される。

- ⑬ babild が終了待機状態になると各 babies へ順次終了要求が掛けられる。
- ⑭ 各 babies が読み出しプログラムを終了する。各 64ch RAINER ボードはサーバー PC とのソケットを破棄し、通信切断を行う。
- ⑮ 各読み出しプログラムが最後のイベントのデータを babies へ送信する。
- ⑯ 各 babies が受信した最後のイベントのデータを babild へ転送する。
- ⑰ 各読み出しプログラムが終了確認応答を babies へ返す。
- ⑱ 各 babies が babild へ終了確認応答を返す。
- ⑲ babild が全ての babies から終了確認応答を受信すると、babild は終了要求を babinfo に掛け、babinfo が各種 DAQ RUN 情報の記録、表示を終了する。
- ⑳ babild が終了確認応答を babicon へ返し、DAQ が終了する。

2.4.2 GTO (General Trigger Operator)

GTO (General Trigger Operator) は、RIBF のイベント同期型 DAQ システムを構築するために開発されたトリガー管理モジュールであり、複数の読み出しモジュールで不感時間を共有させるために用いられる。使用方は以下の通りである。検出器からの信号で作成したリクエストトリガー信号を GTO スタート信号として入力する。GTO はスタート信号が入力された時点で veto 信号が掛かっていなければ、アクセプトトリガーとしてトリガーを発行する。veto が掛かっていれば、そのリクエストトリガーは破棄される。この veto 信号は、GTO からのアクセプトトリガーを受信した各ノードで信号の読み出しが終わったことを知らせる EOB (end of ビジー) 信号を GTO が受信した時点で解除される。これらの処理は FPGA (Spartan-3A) に実装されたファームウェアによって実現されており、XPort/Lantronix を用いたネットワーク通信により babirl の DAQ start/stop 管理プロセッサ babissm からトリガー発行の制御を行うことができる。

2.4.3 トリガー回路図

RIBF DAQ システムでは、読み出したデータがイベント同期していることの確実性を強く求められる。GTO を用いることにより、全ての読み出し系で不感時間を共有してトリガーを発行することができる。今回開発した DAQ システムの概略図を図 2.10 に示す。検出器からの信号をディスクリミネータに入力し、リクエストトリガーとして GTO へ入力する。但し、DAQ サーバーのデータ処理が間に合っていない間はトリガーを生じないように、そのことを示す 64ch RAINER ボードからのビジー信号を veto として利用する。GTO は受け取ったリクエストトリガーをアクセプトトリガーとして各ノードへ発行し、それらのノードからデータ処理が完了したことを知らせる EOB 信号を受信するまで、リクエストトリガーを破棄する。発行されたアクセプトトリガーを基に各読み出しモジュールはデータ取得を行う。またアクセプトトリガー信号は STM へと入力され、イベント番号としてカウントされた値が 64ch RAINER ボードおよび VME-RM へと送信される。各 VME モジュールは VME コントローラへと取得したデータを転送し、VME フロントエンドでの 1 イベント読み出しが完了すると、VME コントローラは読み出し完了の合図として RPV130 のアウトプットレジスタへ書き込みを行い、出力させたパルス信号を EOB として GTO へ入力する。GTO は EOB 信号を受信したタイミングで veto を解除し、次のリクエストトリガーを待機、発行する。

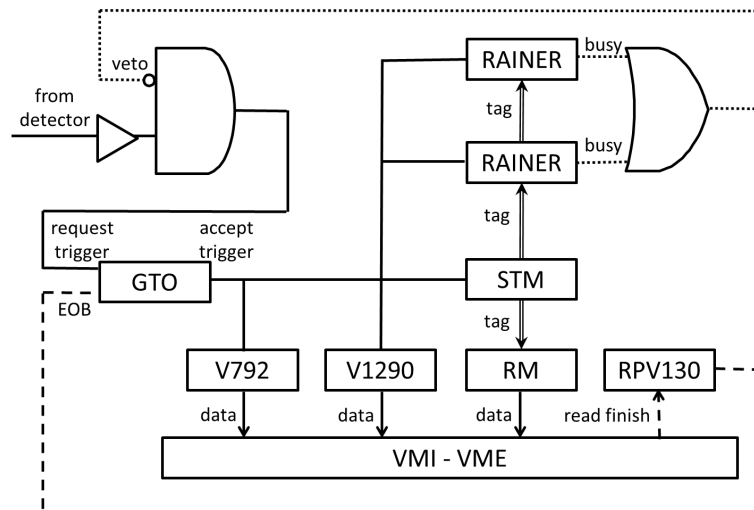


図 2.10: DAQ システムの概略図. トリガー管理を GTO が, トリガータグ配布を STM が担う. 64ch RAINER ボードはサーバー PC へのデータ転送ビジーを veto コインシデンスへ, VME は 1 イベント毎の読み出し不感時間の終了 EOB を GTO へ伝達することにより, アクセプトトリガーを共有する.

第 3 章

データ収集システムの性能評価

物理学実験における DAQ システムの性能を、以下の観点から評価した。

1. データ収集速度

高統計測定を目指した実験や、バックグラウンド事象が多くトリガーの純度が低い実験では、DAQ の高速化により単位時間あたりに処理できるトリガー数を増大させることが重要となる。DAQ システムのデータ収集速度を律速する要因としては、ADC の変換時間、データの転送や計算機の処理速度、データ書き出し速度などが挙げられる。検出器の多チャンネル化が進む現代の物理学実験において、これらの負荷のかかる処理を逐次的に処理するのではなく、機能を分散させることにより処理を並行して進める方が、全体としての高速化につながり、また多数の信号を処理できるとされている。

2. 信頼性

読み出す信号のチャンネル数が増大するにつれ、DAQ システムの信頼性が重要となる。データ収集中にアプリケーションやネットワークの障害が発生した場合、データの損失や再送による転送遅延、順序の入れ替わりなどが発生すると考えられる。並列にデータ処理を行うシステムにおいてこの現象が発生した場合、複数のデバイスで収集したデータの中から同一トリガーの事象を選び出すことが困難になる。そのため、イベントの同一性をデータ上で保証できるシステムとなっていることが望ましい。

3. 既存システムへの接続性

効率的で信頼性のある DAQ システムであっても、収集したデータからイベントを再構成する際に複数の独立したリソースを必要とするシステムでは、実験準備・調整段階から本測定段階への即時移行が求められる物理学実験における DAQ システムとして成立しない。例えばデータを収集しながらオンラインで解析を行おうとする場合、イベントの再構成を簡便に行えることが望まれる。

読み出し系を追加する場合、問題となるのは読み出しチャンネル数の増加だけではない。まず、イベント再構成のためのデータ照合システムが既存のものと同一か互換性のあるものでないと、条件 2. を満たさない。また、既存のオンライン解析システムとの統合までを見据えた場合、既存の DAQ システムと同一のデータ形式で記録し、既存システムに大きな変更を加えることなく接続できることが望ましい。

今回、MWDC 読み出し系として新たに導入した 64ch RAINER によりデータ収集効率を強化し、STM を用いてイベントの照合を行うことができ、また RIBF の標準 DAQ・解析システムへの接続性をもつ DAQ システムの開発を行った。以下では、この DAQ システムの性能を評価した結果について詳述する。

3.1 64ch RAINER-babirl システムのデータ収集効率

64ch RAINER ボードを複数台並列に読み出した場合のデータ収集効率を測定し、評価を行った。データ収集効率は、全リクエストトリガー数に対して実際にデータが収集されたアクセプトトリガー数の割合として計算される。2.2.1 節の通り、64ch RAINER は設定により読み出し方式を選択できる。また、データ転送についても、Nagle アルゴリズムを適用するか否か選択できる。そのため、設定オプション毎にデータ収集効率が異なると考えられる。ここでは、以下の3つの読み出し方式によるトリガーレート耐性を評価した。

1. RAW モード, Nagle アルゴリズム ON

32 MHz サンプリングの FADC が記録するデータを 64 チャンネル分全て収集する。Nagle アルゴリズムによるブロック転送あり。

2. SUPPRESS モード, Nagle アルゴリズム OFF

FADC による波形データは収集せず、TDC ヒットのあったチャンネルについてのみデータ構築を行い、Nagle アルゴリズムを使用せず逐次転送する。

3. SUPPRESS モード, Nagle アルゴリズム ON

同上、Nagle アルゴリズムによるブロック転送あり。

これらの設定におけるデータ収集効率を、ランダムトリガーのトリガーレートを変えながら計測した。ランダムトリガーは、 ^{90}Sr 線源から放出された電子が、プラスチックシンチレータを通過した際のシンチレーション光を、光電子増倍管 PMT (photomultiplier tube) で変換した電気信号により生成した。この信号をディスクリミネータに入力し、そのスレッシュホールドを変更することにより、トリガーレートを 10 Hz から 50 kHz の範囲で調整した。6 台の 64ch RAINER ボードに対し、PMT からのアナログ信号をテスト信号として全 64 チャンネルに分岐して入力した。

TDC 情報を収集する時間範囲は、図 3.1 の通り、トリガー入力時刻から 320 ns 遡ったところからさらに 320 ns 遡った範囲に設定した。また 64ch RAINER ボード自体は、FPGA 内部に作成されたリングバッファにより

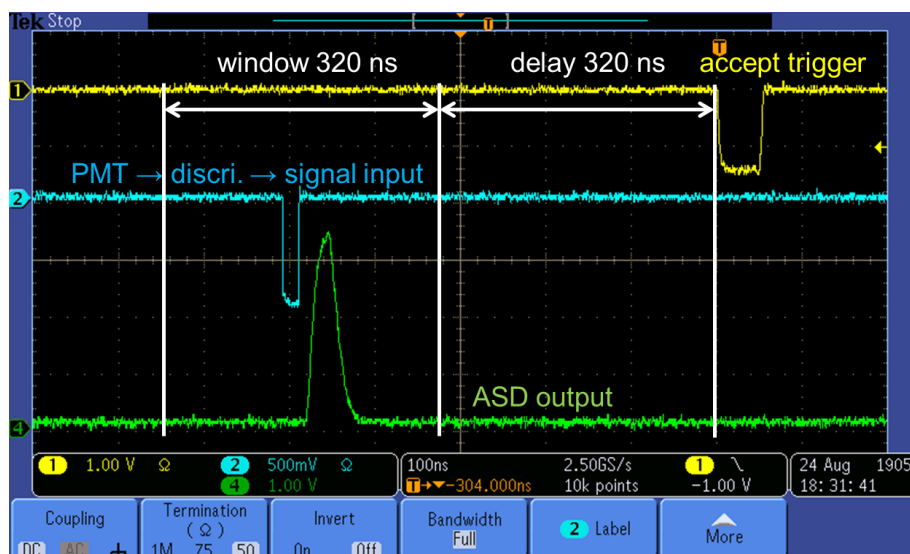


図 3.1: RAINER TDC タイムウィンドウ設定。コモンストップトリガーにより設定した遅延時間分遡ったタイムウィンドウ区間のヒット情報を読み出す。

複数イベントのデータを蓄積できるため、信号の読み出し毎の不感時間を無視することができる設計となっているので、今回のテストでは不感時間として人為的にアクセプトトリガーを $5\ \mu\text{s}$ 遅らせた信号を end of ビジー信号としてトリガーコントローラ GTO に入力するように設計した。

上記の3つの設定における、1トリガーあたりのデータ転送量は、RAW モードで 2,832 バイト、SUPPRESS モードで 528 バイトである。RAW モードのデータの内訳は、ヘッダー 16 バイト、(ADC 2 バイト、TDC 2 バイト) $\times$ 64 ch $\times$ 11 サンプリング、SUPPRESS モードのデータの内訳は、ヘッダー 16 バイト、(ヒットチャンネル データ長、ADC、TOT、TDC) 8 バイト $\times$ 64 ch である。実際に MWDC を用いる場合、この 320 ns のウィンドウの中で 64ch RAINER ボードの全チャンネルに同時に MWDC からのヒット信号が送られてくることはないので、このテスト実験は本番実験で想定される 64ch RAINER ボード 1 台につき 56 バイトと比べて、トリガーあたりのデータ転送量は約 9 倍以上大きい^{*1}。

これらの条件でデータ収集効率について得られた結果が図 3.2(上) の通りである。図は横軸にランダムトリガーのレートを、縦軸にデータ収集効率をプロットしたものである。リクエストトリガーレートを $\lambda\ \text{Hz}$ 、DAQ 不感時間を $\tau\ \text{s}$ とすると、あるリクエストトリガーをアクセプトしたとき、その読み出し不感時間の間に平均 $\lambda\tau$ 個のリクエストトリガーが棄却されるので、DAQ ライブレートは、

$$\text{DAQ live rate} = \frac{1}{1 + \lambda\tau} \quad (3.1)$$

と計算される。図 3.2(上) の曲線は式 (3.1) において $\tau = 5\ \mu\text{s}$ としたものである。上記の3つの読み出し設定におけるデータ収集率を比較してみると、RAW モードの場合、800 Hz 程度のトリガーレート下でデータ収集率が大きく落ち込んでいる。それに対して、SUPPRESS モードの場合、10 kHz 程度までは 90% を超えるデータ収集効率を維持し、式 (3.1) と一致している。しかし、20 kHz に至るまでの間で急激なデータ収集効率の低下が見受けられる。

本番の実験での使用が検討されているのは、3. の必要なデータのみを抽出しブロック転送する読み出しモードである。3. の場合と比較してブロック転送を行わなかった 2. の結果を見てみると、20 kHz を超えたところで両者のデータ収集効率の差が見られる。図 3.2(下) は、各条件でリクエストトリガーから要求されたデータ収集速度と計測したデータ収集効率をプロットしたものである。これを見ると、10 MB/s を超えるところからデータ収集効率が徐々に低下し始め、40 MB/s 程度から急激に低下しているのが分かる。DAQ ソフトウェアの babirl は、その処理能力に使用する PC やネットワークなどのハードウェアの依存性はあるものの、最大データ処理速度が 40 MB/s 付近となるように設計されている。今回のテストでは、1 イベントに対し 64ch RAINER ボード 6 台で合わせて 3 k バイトのデータ構築を行っているため、10 kHz のレートでのデータ処理が限界になる。ゆえに 2., 3. の場合で 10 kHz を超えるデータ処理を行おうとすると、babirl のイベント構築が律速し始め PC の受信バッファに未処理のデータが蓄積し、最終的に 64ch RAINER からのデータ受信を拒否するようになる。但し、Nagle アルゴリズムは送信先の PC でのデータ処理速度を転送データの確認応答が得られるまでの時間で推定した上でブロック転送を行うため、3. は 2. の場合よりも DAQ ソフトウェアの限界付近においてデータ処理の負荷を軽減し、その結果データ収集効率の低下を緩和した、と考えられる。

本研究では、2.4.1 節にある通り、データを送受信しイベント構築を行うスレッドを複数同時に実行することにより、ネットワーク経由で複数台の 64ch RAINER ボードからのデータ処理を並行して行う。これに対し、先行研究 [24] の場合には、1 つのソフトウェアで 5 台の 64ch RAINER ボードを順に読み出している。先行研究でも、20 kHz 程度のトリガーレートで急激なデータ収集効率の低下を観測している。しかしこのときの条件

^{*1} MWDC に 64ch RAINER ボードを接続する場合、ボード 1 台につき MWDC のワイヤー面 2 面からの信号を読み出す。上記の 56 バイトという値は、1 つのイベントで 1 面あたり 2 本のワイヤーがそれぞれ 2 回ヒット信号を送出するという、考えられる最大のデータ量の状況を想定して換算したものである (56 = ヘッダー 16 + 10 (ヒットチャンネル データ長、ADC、TOT、TDC1st ヒット、TDC2nd ヒット) $\times$ 2 面 $\times$ 2 ワイヤー)。

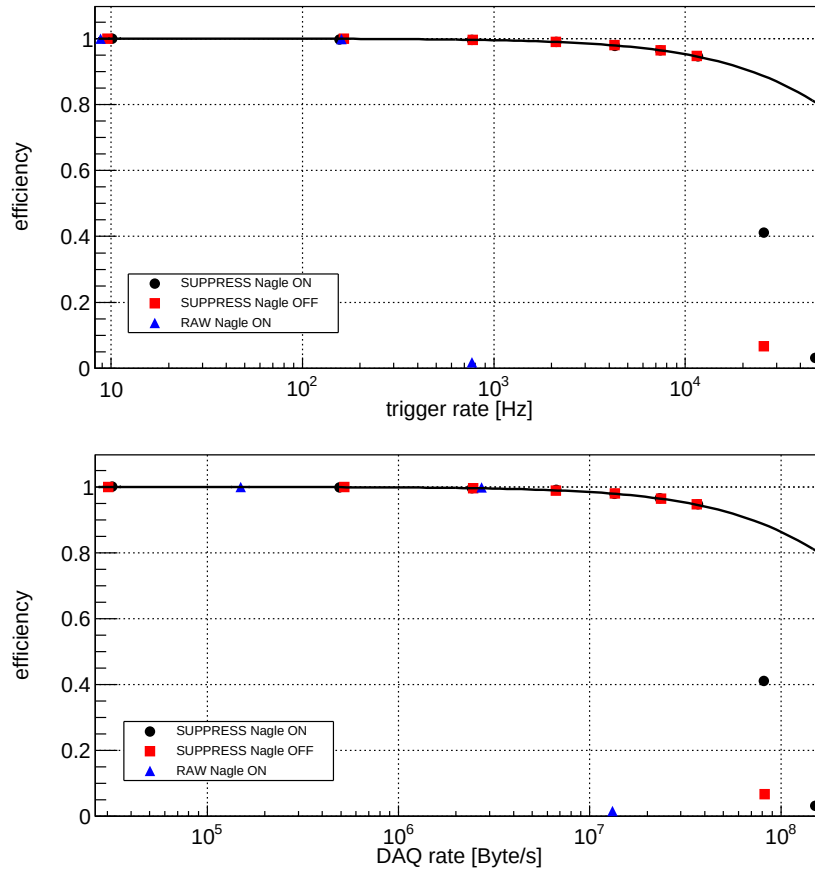


図 3.2: RAINER ボードのデータ収集率のトリガーレートによる変化 (上) と読み出しデータ量の関係 (下). SUPPRESS モード使用時は 10 kHz, 40 MB/s までライブラリ曲線に従い, babir1 のデータ処理速度の上限を迎え, その後失速する.

は, 64ch RAINER ボード 1 台あたり 1 チャンネルだけしか読み出しておらず, 本研究における全チャンネルの読み出しと比較すると, 転送データ量にして約 25% にしか及んでいない.

以上により, 今回複数台の 64ch RAINER ボードを並列に読み出すシステムを開発し, データ処理の負荷を削減するために SUPPRESS モードでデータを収集した場合, 40 MB/s 程度のデータ転送レートに対して 90% のデータ収集効率を達成することができた. さらに Nagle アルゴリズムを使用することで, DAQ ソフトウェアの負荷が緩和されることも確認できた.

3.1.1 64ch RAINER の不感時間

64ch RAINER ボードは読み出しイベント毎にビジー信号を出さないため, GTO に入力する end of ビジー信号のアクセプトトリガーからの遅延時間を調整し, 64ch RAINER ボードの不感時間を調べた. 64ch RAINER ボード 6 台について, SUPPRESS モード, Nagle アルゴリズム ON で, babir1 を用いてデータ構築を行った. 収集するデータは前節と同じく, シンチレータに ⁹⁰Sr 線源から放出された電子がヒットした信号の PMT 出力波を 6 台の RAINER ボードの全チャンネルに入力したもので, 1 イベントあたりのデータサイズは 6 台分合わせて $528 \times 6 = 3168$ バイトである. 今回の場合, DAQ ソフトウェアの上限 40 MB/s に相当するトリガーレー

トは約 13 kHz とされるため、トリガーレートがおよそ 10 kHz になるようにディスクリミネータスレッシュホルドを調整し、DAQ 終了時に各 64ch RAINER ボードで取得したイベント数に不一致が見られないことを確認した上で、不感時間を調べた。表 3.1 に、設定した veto 時間の下でのデータ収集率と式 (3.1) から計算されるライブレートをまとめる。10 kHz のリクエストトリガー条件下では、実際のデータ収集効率と DAQ ライブレー

表 3.1: veto 時間とデータ収集率の関係.

veto [μ s]	req. trig. [kHz]	acc. trig. [kHz]	efficiency [%]	live rate [%]
5	10.6	10.0	94.6	95.0
1	10.7	10.5	98.2	98.9
0.5	10.7	10.6	98.7	99.5
0.1	10.6	10.6	99.2	99.9
0.05	10.6	10.5	99.2	99.9
0.01	10.6	10.5	99.3	99.9
0.005	10.8	10.7	99.3	99.9
0.001	10.7	10.6	99.3	99.9

トがほぼ一致しており、ほぼ不感時間なく 99% 以上のデータを収集できることが判った。MWDC 2 台を用いる本番の実験で、18 面全てにおいてワイヤー 2 本がそれぞれ 2 回信号を出した場合にデータサイズは 1 イベントあたり 488 バイトである (ヘッダー 16 バイト $\times$ 64ch RAINER 8 台 + チャンネルあたりのデータサイズ 10 バイト (SUPPRESS モード, TDC 2nd ヒット有) $\times$ 2 ワイヤー $\times$ 18 ワイヤー面)。本番の実験条件に換算すると、10 kHz $\times$ 3168/418 $\sim$ 65 kHz に相当するトリガーレート耐性を達成できることになる。

3.1.2 イベント照合

64ch RAINER ボード間あるいは 64ch RAINER ボードと他の読み出しモジュール間のイベント照合には、2.3.1 節にて説明した STM を使用する。64ch RAINER ボード単体では、TDC と ADC の値とそれらが自身で計測した何番目のトリガーのときのものであるかを記録する機能しか有しておらず、他のシステムとの同期はおろか、複数台の 64ch RAINER が同一のトリガーに対して同期した読み出しを行っていることを保証する機構が無い。また、babirl を用いて複数の読み出しモジュールからのデータ処理を並行して行う場合、各読み出しモジュールが独立したシステムとして稼働することによる部分的なリソースの逼迫や、並列化されたデータ転送が行われるネットワーク内において偶発的なパケットの喪失や破損、順序の入れ替わりが起こりうる。これらのうち、データの破損については中身の確認等により排除されるため、ここでは考えない。その他の場合、イベント再構築の際に真のイベントの順序とは一部入れ替わった構成でデータが構築される可能性がある。実際の実験現場において、複数の読み出しシステム間でイベントスリップが発生すると、それ以降の計測データでイベント構築が行えなくなるため、イベント照合は DAQ システムの信頼性を担保するという意味で重要である。これを抑止するのがイベント照合の仕組みである。

そこで、STM を用いることによりトリガータグ情報が正しく、複数台の 64ch RAINER ボードがそれぞれ読み出すデータとして取り込まれ、イベント同期の確認が行えるか検証した。GTO からのアクセプトトリガーをイベント番号として STM へ入力し、各 64ch RAINER ボードに配布した。これにより各 64ch RAINER ボードは、読み出した TDC などの情報に加え、それらが DAQ システム全体で共有されている何番目のトリガーに対応するものであったかをデータとして記録する。64ch RAINER の場合、イベント番号の情報は 12 ビットで

記録される。読み出した情報と共にイベント番号がデータに含められるため、オンライン解析の段階で、イベント番号とデータを結びつけることができる。また、64ch RAINER ボードは、トリガータグ情報の伝達がデジタイゼーションにより遅延することを防ぐため、2台1組の合計3組でSTMへ接続した。

図3.3-3.5は順に、上記の設定の下、7 kHz, 12 kHz, 26 kHzの各リクエストトリガーに対し、データ収集効率を計測した図3.2ときに、2, 3, 4台目の64ch RAINER ボードと1台目の64ch RAINER ボードがSTMから受信したイベント番号の差をヒストグラムにしたものである。ここでは本番の実験と同じ読み出し方式のSUPPRESSモードでNagleアルゴリズムを使用した場合の結果を報告する。但し、64ch RAINER ボードはイベント番号を12ビット分しか記録できず、またSTMが配布するイベント番号はデータを取得する度にリセットしなかったが、以下の解析結果で示すイベント番号は、最初に取得したデータのイベント番号を0として昇順に割り当て直したものである。なお、6台目の64ch RAINER ボードについては、イベント番号を受信するコネクタ部に欠損が生じたため、イベント番号を受信させることができなかった。DAQソフトウェアの上限40 MB/sに差し掛かる12 kHzトリガーレートでは、4台目の64ch RAINER ボードと1台目とのイベント番号の差が-1のイベントが1回発生している。さらに高レートな26 kHzの場合は、64ch RAINER ボード1台目と3, 4台目との間で1イベント分のずれが生じ、5台目に至っては大幅なイベントのずれが生じた。これらのイベントの不一致はSTMによるイベント番号に加え、babirlのDAQ制御GUIからも取得したデータの総イベント数の不一致として確認できている。26 kHzのトリガーレートでデータ収集を行った際、5台目の64ch RAINER ボードは他のボードに比べ取得したデータが約1万イベント少なかった。

上記の条件の下、各イベントのデータ上で64ch RAINER ボード5台が記録したイベント番号を比較したところ、10 kHz以下のランダムトリガーでは、イベントの不一致は確認されなかった。10 kHzという状況は30 MB/s以上の転送レートに相当し、イベント番号の不一致の原因は、babirlのイベント再構築プロセッサに設計以上の処理負荷を掛けたことであると考えられる。

3.2 VME との統合

VMEは、RIBFにおける既存検出器読み出し系として標準的に使用されているフロントエンドである。MWDC読み出し系である64ch RAINER ボードとVMEが統合したシステムを構築することは、本章冒頭で課題とした3.接続性の観点からも重要である。図3.6に評価テストに用いた回路の概略図を示す。3.1節のデータ収集率の評価の場合と異なるのは、64ch RAINER ボードに加えてVMEも並行して読み出されている点である。データ収集の方法は先程と同じく、ランダムトリガーを使用し、PMTからの信号を64ch RAINER ボード全6台64チャンネルに入力した。64ch RAINER ボードの読み出し設定には、前節3.のSUPPRESSモードでNagleアルゴリズムを使用した方法を選んだ。VME側には、プラスチックシンチレータに接続したPMTの ^{90}Sr 線源による出力信号の波高とタイミングをそれぞれVMEモジュールのV792N(QDC)とV1290N(TDC)で読み出した。VMEバスコントローラにはV7768/GE Intelligent Platformsを用い、割り込み信号はV1290から発生させた。また、CPUの負荷を軽減するために、V1290はDMA(Direct Memory Access)転送にてCPUを介さずに直接メモリからデータを送信するように設定した。

以上の準備でbabirlを用い、64ch RAINER ボード6台とVMEクレート1台の合計7つのノードからのデータを集約し、イベント照合とトリガーレートに対する応答の調査を行った。

3.2.1 64ch RAINER-VME システムのデータ収集効率

babirlを用いる場合、厳格なイベント同期型DAQシステムゆえ、システム全体で不感時間を共有させなければならない。そのため、システム全体のデータ収集速度は、最も長い不感時間をもつ読み出し系に律速され

る。今回の場合、ほぼ不感時間をもたない 64ch RAINER ボードに対して、VME はどうしても $100\ \mu\text{s}$ 以上の不感時間をもってしまったため、システム全体のデータ収集率は VME のデータ収集率とほぼ一致した。

前節の 64ch RAINER ボードのみでの DAQ 速度評価の場合と同じように、線源を用いてシンチレータに接続した PMT からのアナログ信号のディスクリミネータ・スレッシュホールドを変更することによりトリガーレートを変化させながら、データ収集効率を計測した。64ch RAINER ボードの読み出し方式はこれまでと同様に、SUPPRESS モードで Nagle アルゴリズムを使用し、1 イベントあたりのデータ収集量は、64ch RAINER ボード 6 台すべてで 64 チャンネル分各 528 バイトを読み出した。VME については、前節と同じくスケーラー (RPV-100), QDC (V792N), TDC (V1290N), RM を読み出した。データ量は 1 イベントあたり、スケーラー 32 バイト, QDC 72 バイト, TDC 52 バイト, RM 12 バイトで合計 3.336 k バイトである。

図 3.7 は、ランダムトリガーでの各レートに対して得られたデータ収集効率の変化を表す。図 3.7 の丸印は 64ch RAINER-VME 統合系、四角印は VME のみでデータ収集した場合である。三角印は参考のために、V792N 以外の VME モジュールのみを読み出した場合のデータ収集効率である。図を見ても分かるように、丸印と四角印は重なっており、64ch RAINER を読み出しモジュールとして含めようが含めまいがデータ収集効率は変化しないことが確認できる。両者のデータ収集効率は、約 1.5 kHz 程度のリクエストトリガーレートに対して 70%, 2 kHz に対して 50% であった。

また、図 3.8 は、各 VME モジュールの読み出し不感時間をそれぞれ約 300 Hz(上), 約 7.5 kHz(下) のリクエストトリガー条件下で計測したものである。今回使用した各 VME モジュールの不感時間は、インターラプトレジスタ RPV130/REPIC のアウトプットレジスタ機能を用いて、各モジュールの読み出しが終了した時点でパルスを出力させ、それをオシロスコープで確認した。300 Hz, 7.5 kHz のリクエストトリガーに対して不感時間は、それぞれ合計 $131\ \mu\text{s}$, $594\ \mu\text{s}$ となっていた。図 3.8 に表した曲線は、上から順に式 (3.1) において不感時間を $131\ \mu\text{s}$, $360\ \mu\text{s}$, $594\ \mu\text{s}$ としたものである。図よりトリガーレートが 200 Hz を超えるあたりから不感時間が徐々に大きくなっていくことが分かる。各モジュールが読み出しているデータ量にトリガーレート依存性が無かったことから、不感時間のトリガーレート依存性の原因として、VME コントローラのデータ処理能力の低さが考えられる。64ch RAINER ボード単独でデータ収集効率の評価を行った場合には、今回の 10 倍以上の効率で DAQ システムが動作していたことから、サーバー PC およびネットワークの処理能力により律速されているとは考えにくいからである。また本番の実験で想定されるトリガーレート 1 kHz 下では、図から 75% 程度のデータ収集効率が読み取られ、式 (3.1) から不感時間はおおよそ $330\ \mu\text{s}$ と計算される。

3.2.2 イベント照合

VME モジュールの読み出したイベントの番号は、J-PARC で開発された VME-RM システムを用いて各イベント読み出しループの最後に STM から受信するように設定した。但し、この VME-RM は、稀にトリガー情報の更新に失敗することが報告されており (J-PARC の K1.8 ビームラインではケーブル等の状態により 1% 程度)、完全なイベント照合の際には障害となる可能性がある。今回は VME スケーラー/REPIC RPV-100 を補助的に使い、同一バス内の VME モジュールの間での整合性を確認しながら、64ch RAINER ボードとのイベント照合を行った。実際、今回収集したデータにおいても、VME-RM がイベント番号の更新に失敗したと考えられる結果が得られ、VME スケーラーによる整合性の確認が必須となった。このような準備の上で、イベント再構築されたデータを確認したところ、64ch RAINER-VME 間でのイベントの不一致は確認されなかった。これは 3.1.2 節で考察したように、今回用意した VME の書き込みデータ量と不感時間では babirl のデータ処理上限に到達できなかったためと考えられる。babirl の上限値 40 MB/s に達するには今回の場合、10 kHz のトリガーアクセプトレートを維持しなければならないため、例えば 20 kHz のトリガーリクエストに対し $50\ \mu\text{s}$ の不感時間で 50% のデータ収集効率を実現させる必要がある。

3.3 DAQ システムの性能

本論文ではこれまで、開発した DAQ システムの性能について、1. 収集速度、2. 信頼性、3. 接続性の 3 つの観点から評価してきた。その結果、接続性については、RIBF で標準的に用いられている VME モジュールと 64ch RAINER ボードのデータフローを統一することに成功し、オンライン解析等のシステムを統合的に利用できるようになった。次に、信頼性については STM トリガータグ情報分配システムの導入により、DAQ ソフトウェアのデータ処理能力を超えない限り 64ch RAINER ボード間でイベントの不一致は発生しないことが分かった。さらに、64ch RAINER-VME 間でも、同システムと VME スケーラーを補助的に用いることにより、今回調査した条件の範囲内ではイベントの不一致が確認されず、十分に高い信頼性をもっているといえる。最後に、データ収集速度については、64ch RAINER ボードが非常に高速なシステムであるのに対して、VME が現代の科学技術から見ると処理速度の点において有効性に欠けるものとなっており、全体を律速した。しかし旧来のシステムと比べると、64ch RAINER ボードを用いた読み出しの並列化によって、不感時間から MWDC の信号を読み出すための不感時間が解消された分、高速化は実現された、結果として想定される 1 kHz のトリガーレートに対して 75% と、目標にしていた DAQ 速度をほぼ達成することができた。今回有効性のあることが示された読み出しの並列化や SiTCP を用いた高速データ通信システムとして例えば、RIBF において開発されている既存 VME モジュール並列化システム [35] や J-PARC において開発されている COPPER ボード [36] を今後さらに適用していくことにより、目標は実現可能であると考ええる。

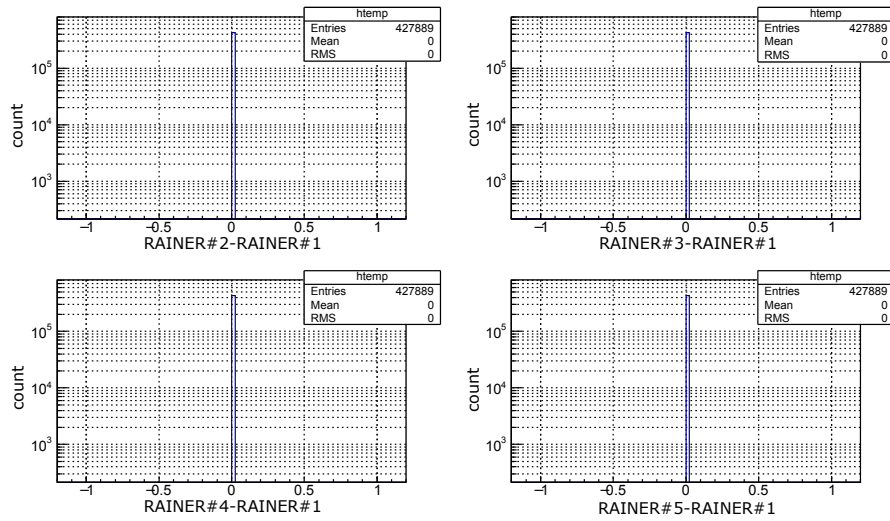


図 3.3: トリガーレート 7 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合. 約 43 万の全イベントについて各ボードが記録したイベント番号の不一致は見つからなかった.

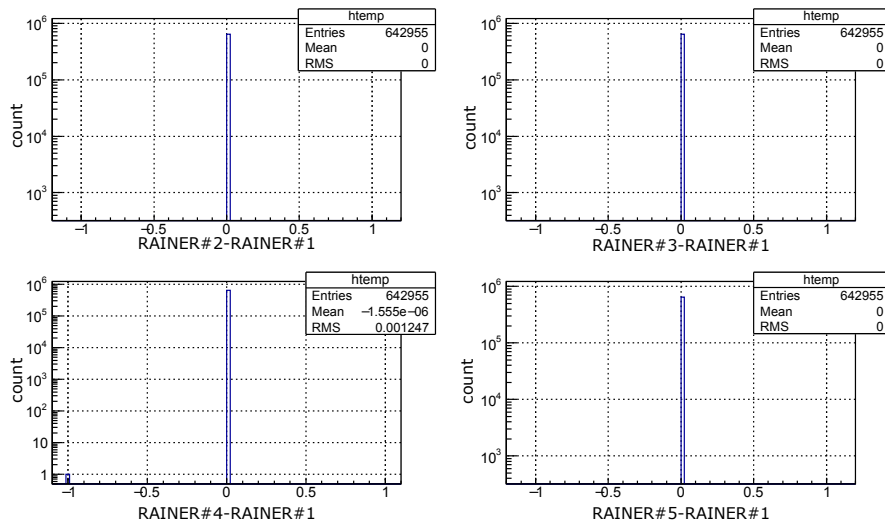


図 3.4: トリガーレート 12 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合. 4 台目のボードからのデータが 1 イベント分だけイベント構築に失敗した.

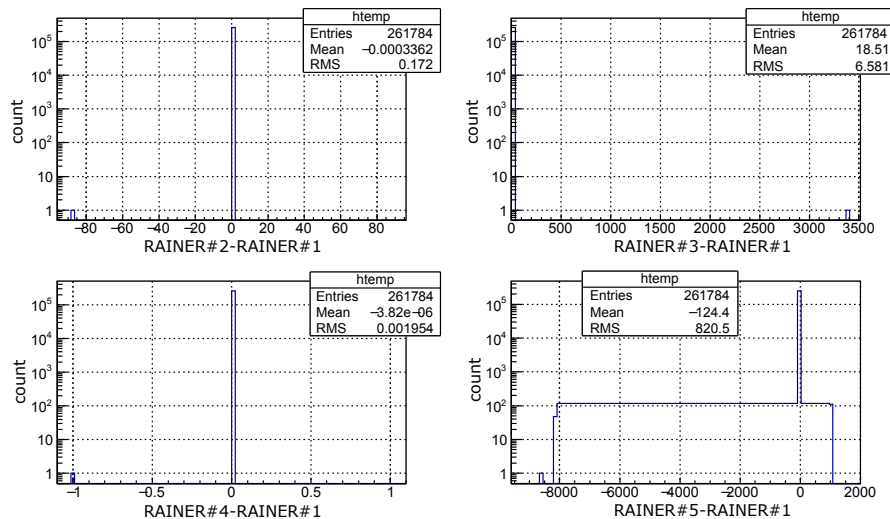


図 3.5: トリガーレート 26 kHz における 64ch RAINER ボード 5 台のイベント照合. 2, 3, 4 台目のボードがそれぞれ 1 イベント分だけ, 5 台目のボードは大幅なイベントのずれが生じた.

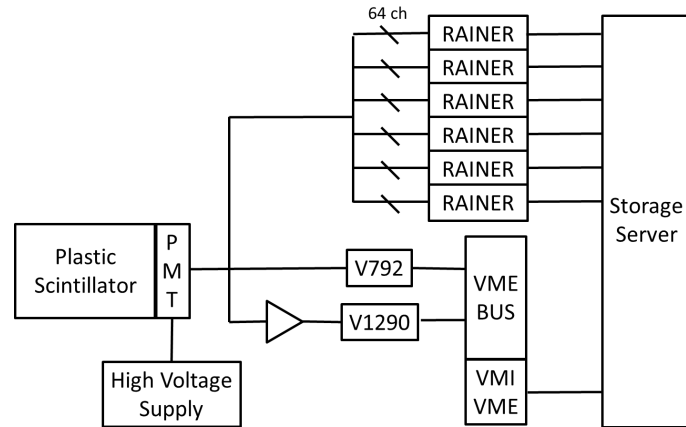


図 3.6: DAQ システムの評価用回路の概略図. ^{90}Sr 線源によるシンチレーション光の信号をランダムトリガーとして使用した.

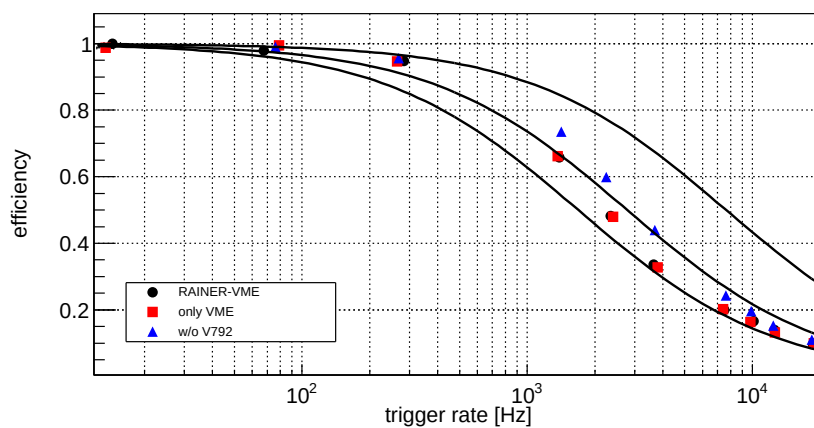


図 3.7: RAINER-VME でのデータ収集効率. トリガーレート 300 Hz –10 kHz に対して不感時間が ^{90}Sr 130 μs –590 μs 変化することが確認された.

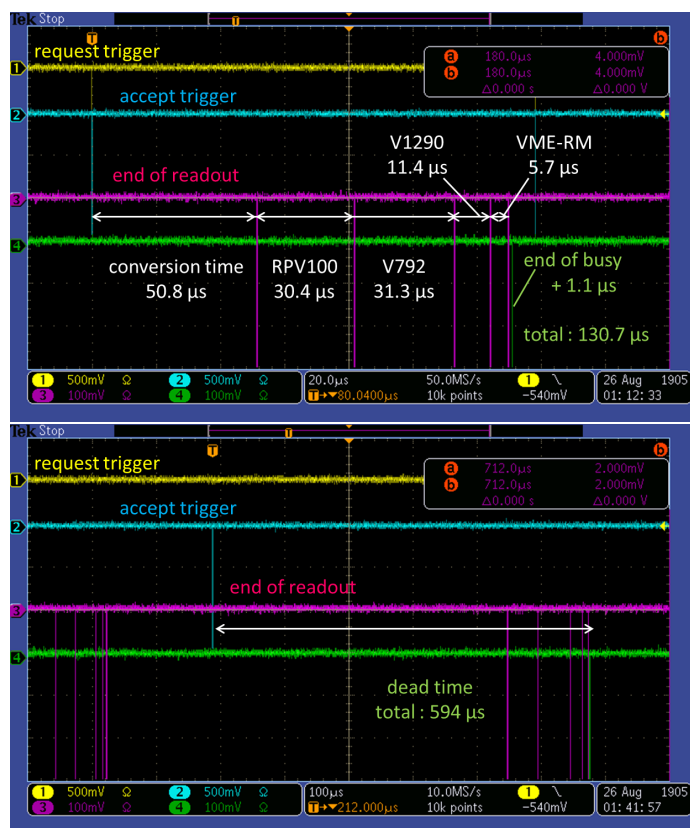


図 3.8: VME モジュールの読み出し不感時間. 上は約 300 Hz, 下は約 7.5 kHz のトリガーレート下で記録した.

第 4 章

ビームを用いたデータ収集系総合テスト

3 章では、テストベンチによる DAQ システムの性能評価について報告したが、本章では実際の実験条件により近い環境で行ったテストの結果について述べる。具体的には、開発した DAQ システムを MWDC 飛跡検出器に接続し、加速器から取り出したビーム由来の信号を計測することで、DAQ システムの実地における総合的な性能についての評価を行った。最も重要な DAQ のテスト項目は、64ch RAINER ボードで読み出す MWDC と VME モジュールで読み出すシンチレーションカウンターの 2 系統から得られるデータを統合的に解析する手法を確立することである。複数のノードから独立に得られるデータは、イベント毎に統合されるが、同一のイベントであることが測定結果として期待されるべき物理的意味をもって保証されなければならない。テストは本番実験を想定し、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター CYRIC においてビームを用いて行った。以下では、このテストの結果について述べる。尚、このテスト実験は新たに開発した MWDC の性能評価を兼ねており、以下ではまず新規 MWDC について概説する。

4.1 MWDC の構造

新たに開発した MWDC は低圧型となっており、内部に $\sim 10\text{kPa}$ 程度の低圧ガスを封入して動作させるために、外部とウィンドウ膜で仕切られた内部構造をもつ。MWDC の開発動機については付録 A に記述する。このウィンドウ膜は、使用する環境によって異なる MWDC の内外の圧力差に耐えられる強度をもっていなければならない。今回のテスト実験では MWDC を大気圧下で使用するため、アルミ蒸着したアラミド $125\text{ }\mu\text{m}$ をウィンドウ膜として使用した。内部は常時 13.3 kPa の純イソブタン低圧ガスで満たされるように毎分 $100\text{--}150\text{ ml}$ の流量で調整した。

図 4.1 が今回開発した MWDC の外観と内部設計である。この MWDC は、 $X\text{-}X'\text{-}X''$, $U\text{-}U'\text{-}U''$, $V\text{-}V'\text{-}V''$ の 9 つのワイヤー面で構成される。これらのワイヤー面はウィンドウ膜と平行に配置されており、各面が 10 mm 間隔で並んでいる。さらにワイヤー面を挟むように、アルミ蒸着した $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚のマイラー膜から構成されるカソード面が配置されている。X 面のワイヤーは鉛直方向に、U 面のワイヤーは X 面のワイヤーに対して 30 度傾いた方向に、V 面のワイヤーは U 面とは逆に 30 度傾いた方向に張られている。各面では、センスワイヤーとポテンシャルワイヤーが交互にそれぞれ 24 本、25 本ずつ 5 mm 間隔で並ぶ。センスワイヤーには直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ の金メッキタングステン、ポテンシャルワイヤーには直径 $75\text{ }\mu\text{m}$ の銅メッキタングステンを使用した。以上のように配置したカソード面とポテンシャルワイヤーに陰極電圧を印加することにより、形成されるセンスワイヤーを中心とした静電場の 1 区画をセルと呼ぶ。X, U, V の 3 つの系統のそれぞれにおいて、 $(\text{---})\text{'---})\text{'---})$ で表記される面は互いに $1/3$ セルずつ順にずらされた配置で並べられている。有感領域は横 240 mm 、縦 144 mm である。

テスト実験では、低圧純イソブタンガスをを用いた場合の検出効率について、印加電圧依存性を調べた。また、

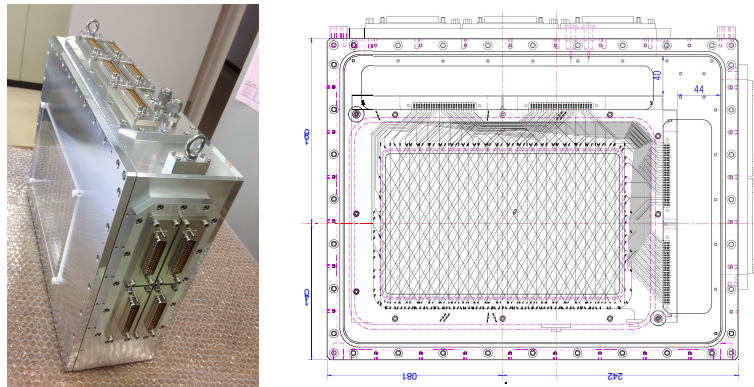


図 4.1: MWDC の構造. X-X'-X'', U-U'-U'', V-V'-V'' の 9 つのワイヤー面で構成される低圧 MWDC を開発した.

位置分解能を評価するためのデータを取得した. 実験中に 64ch RAINER ボード 8 台のうち 2 台がハードウェアの故障により動作しなくなったため, MWDC 1 台の解析を行って DAQ システムを含む MWDC 飛跡検出器システムの性能を評価した.

4.2 CYRIC におけるテスト実験

CYRIC における今回のテスト実験では, 小型電子サイクロトロン共鳴イオン源から供給される陽子を 930 型 AVF サイクロトロンで 30 MeV まで加速して用いた. CYRIC41 コースに MWDC とシンチレーションカウンタを設置し, ビームを照射した. 図 4.2 に検出器セットアップの模式図を示す. MWDC は 2 台を串

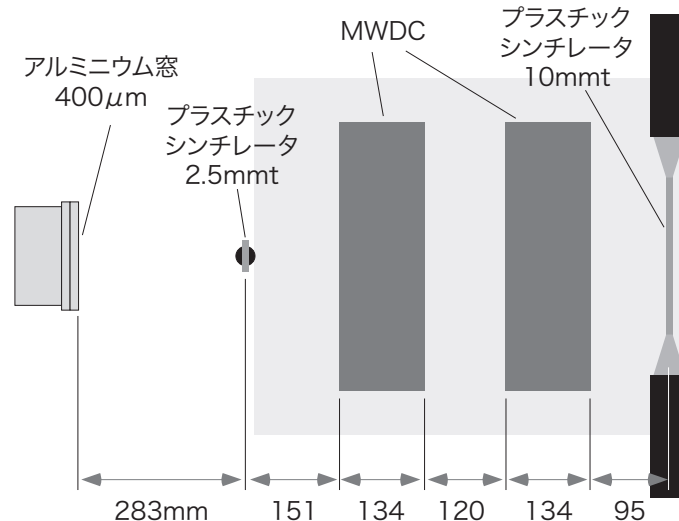


図 4.2: CYRIC におけるテスト実験の検出器セットアップ. 2 台の MWDC を 2 枚のプラスチックシンチレータで挟み, 陽子をトラッキングした.

刺しに配置し, その上流と下流に 1 つずつシンチレーションカウンタを設置した. 上流側のシンチレータは 50 mm × 50 mm × 2.5 mm のプラスチック製で下方に PMT が接着されている. 下流側のシンチレータは 250 mm × 100 mm × 10 mm のプラスチック製で, 両端に PMT が接着されており, 長手方向が MWDC のワイ

ヤーと垂直になるように設置した,

30 MeV で照射される陽子ビームは, ビームライン出口の真空窓や上流シンチレータの中でのエネルギー損失を経て, 表 4.1 に示すように約 21 MeV の運動エネルギーのビームとして MWDC に入射する. この実験条件により, 本番の実験における運動エネルギー 120 MeV/u の ^3He とほぼ等しいエネルギー損失 (0.5 MeV) を再現することができる. ビームの角度分布を広げる光学系を用いたため, 検出器入口でのビームの位置広がり $\phi = 60$ mm 程度であった. ビーム強度は 1 kHz から 100 kHz まで変更した.

表 4.1: 陽子のエネルギー損失と角度散逸.

	T_p^{in} [MeV]	T_p^{out} [MeV]	ΔT_p [MeV]	$\Delta\theta$ [mrad (σ)]
アルミ窓 (400 μm)	30	28.4	1.6	11.5
大気 (435 mm)	28.4	27.7	0.7	6.1
シンチレータ (2.5 mm)	27.7	22.1	5.6	15
カプトン窓 (125 μm)	22.1	21.7	0.4	4.8
カソード面 Al-Mylar (2.5 $\mu\text{m} \times 10$)	21.7	21.6	0.1	1.9
イソブタン (13.3 kPa, 114 mm)	21.6	21.6	0.0	1.5
カプトン窓 (125 μm)	21.6	21.2	0.4	4.9
大気 (120 mm)	21.2	20.9	0.3	4.7
カプトン窓 (125 μm)	20.9	20.5	0.4	5.0
カソード面 Al-Mylar (2.5 $\mu\text{m} \times 10$)	20.5	20.4	0.1	1.9
イソブタン (13.3 kPa, 114 mm)	20.4	20.4	0.0	1.5
カプトン窓 (125 μm)	20.4	20.0	0.4	5.1
大気 (120 mm)	21.0	19.7	0.3	4.5
シンチレータ (10 mm)	19.7	0	19.7	

トリガーは, 下流側シンチレーションカウンタでのヒットにより左右の PMT から出力される信号のコインシデンスから作成した. 図 4.3 は検出器の測定回路の模式図である. シンチレーションカウンタに接続し

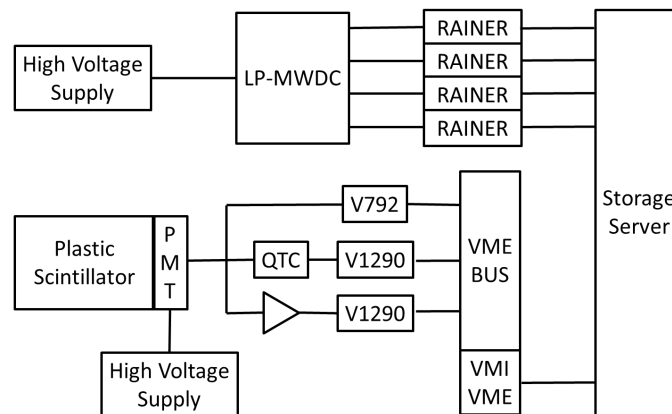


図 4.3: CYRIC におけるテスト実験で使用した測定回路の概略図. MWDC からの信号を 64ch RAINER ボード, プラスチックシンチレータからの信号を VME モジュールで読み出した.

た PMT からの信号は分岐された後, 片方は VME の QDC へ, もう一方はディスクリミネータを通して VME

の TDC へ接続され、それぞれ波形と時間の情報として読み出される。オンライン解析時にビーム粒子が検出器を通過したことを保証できるよう、上流側シンチレーションカウンターの信号も同様に同時記録した。MWDC が検出する信号は、直接 64ch RAINIER ボードに接続して読み出した。以下では、ビームタイム中に行ったオンライン解析の結果を報告する。

4.2.1 MWDC の検出効率

MWDC の低圧動作については文献 [21] に詳しい。純イソブタンガスにより 200 MeV/u の ^6He などについて既に計測が行われているが、本研究で用いる MWDC はワイヤー面構成やセルサイズが文献のものと異なるため、動作条件を変更しながら検出効率を計測し、MWDC が安定的に高い検出効率を維持する条件として最適な条件を調べる必要がある。ここでは、MWDC のカソード面とポテンシャルワイヤーに印加する電圧を変えながら検出効率を計測した。

図 4.4 上は、MWDC(下流)の各面でポテンシャルワイヤーとカソード面に印加した電圧を横軸に、検出効率を縦軸に取ったものを示している。検出効率はそれぞれの面における全イベント数のうち、TDC ヒットが

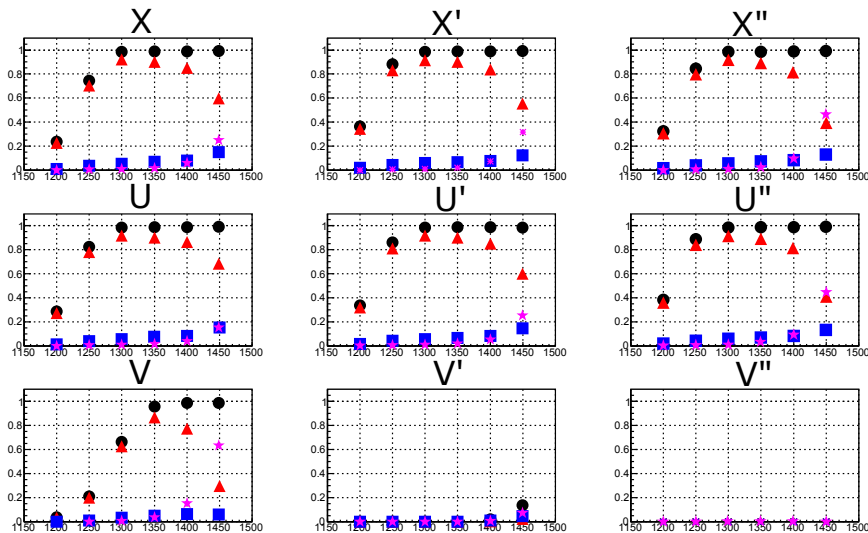


図 4.4: 下流側 MWDC の各面での検出効率。横軸はカソード面とポテンシャルワイヤーへの印加電圧 [-V]、縦軸は全イベントに対する TDC ヒットを記録したイベント数で評価した検出効率。-1350 V 以上の電圧を印加することにより V', V'' の 2 面を除く全 7 面で 98% 以上の検出効率を得られることが確認できた。

あったイベント数の割合で計算した。図 4.4 の丸印は多重度 1 以上、三角印は多重度 1、四角印は多重度 2、星印は多重度 3 以上についての検出効率を表している。印加電圧が -1350 V を超えると、V', V'' を除く 7 面で 98% 以上の検出効率を得られることが分かった。V', V'' の不具合はこれら 2 ワイヤー面を挟む 3 枚のカソード面の導通が失われ、電圧を供給できていなかったことが原因であった。以降はこの 2 ワイヤー面を除いて解析を行う。尚、上流側の MWDC については、カソード面の片面で導通が失われるなどの理由により、複雑な形で同様の問題が発生したため、本論文では下流側の MWDC についてのみ解析を行う。この測定から MWDC に印加する電圧として -1350 V を標準設定とした。

4.3 MWDC のトラッキング

MWDC の解析は以下の 2 段階で行った。

- TDC 時間情報のドリフト長への変換
- ワイヤー面毎にヒット位置についてワイヤーからの左右の組み合わせを作成し、各組合せに対して粒子の軌道を最小二乗法で構成した候補の中から、推定したドリフト長との残差の二乗和が最小となるものをトラッキングの結果として選ぶ

4.3.1 X-T 曲線の作成

TDC 時間情報を基に、荷電粒子が MWDC を通過することにより電離した内部ガスの電子のセンスワイヤーまでのドリフト時間を見積もる。MWDC からの信号に対し、プラスチックシンチレータの両端に取り付けた PMT2 台の信号のコインシデンスをイベント発生時刻として 600 ns 遅延させたものを common stop 信号として使用した。この TDC 時間情報を電離電子のドリフト距離に変換するための曲線を作成した。この曲線を X-T 曲線と呼ぶ。MWDC の面に対して粒子が一様に入射すると仮定し、ドリフト時間とドリフト距離の密度分布関数をそれぞれ $\rho(t)$, $\rho(x) = \rho \text{ const}$ とおくと、測定時間内に発生した電離電子数で両者は結び付けられる。ドリフト距離 X は、最大ドリフト時間 t_{max} を用いて以下のように求められる。

$$\begin{aligned} X &= \int_0^{t_{\text{max}}} \frac{dx}{dt} dt \\ &= \frac{1}{\rho} \int_0^{t_{\text{max}}} \rho(t) dt \end{aligned} \quad (4.1)$$

図 4.5 に印加電圧を -1350 V に設定して X 面で得られた TDC 分布を示す。赤線は多重度 1 以上、青線は多重度 1 のみの TDC ヒットで作成した。

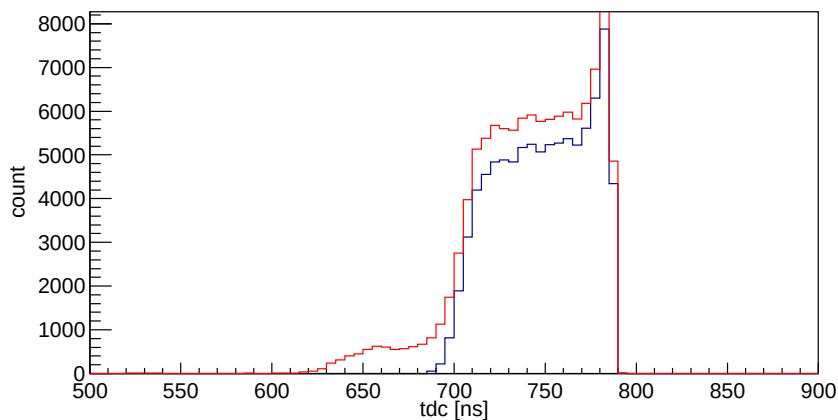


図 4.5: X 面で得られた TDC 分布。赤線は多重度 1 以上、青線は多重度 1 のみの TDC ヒットで作成した。

多重度 1 のみのヒット (それぞれ図 4.4 の丸印、三角印に対応) で得られたものである。多重度が大きくなると、TDC 値が 700 以下の領域から裾構造が現れ始める。ここでプラスチックシンチレータからのスタート信号を遅延させて common stop 信号として入力しているの、TDC 値が小さいほど荷電粒子のヒット位置がセンスワイヤーから遠く、ポテンシャルワイヤーから近くなる。またワイヤー付近では急勾配の電場が形成されてい

るため、陽子1個の通過を複数のヒットとして計数することが知られている。ゆえにこの裾構造はポテンシャルワイヤー付近での1ヒットによりセルの内外で多重ヒットとして記録されたイベントであると考えられる。すると、多重度を1のみに限定してX-T曲線を作成し、裾構造からの寄与を取り除く場合、ポテンシャルワイヤー付近のイベントを選択的に排除することになる。これではX-T曲線を作成するために仮定した粒子がセルに対して一様に入射するという条件が歪められてしまう。以上の理由により、今回は多重度1以上のTDC分布(図4.5 赤線)を用いて、TDC値の小さい方から最大ドリフト距離である5 mmを $\rho(t)$ に対して線型に割り当てることによりX-T曲線を作成した。 $\rho(t)$ を $600 \leq \text{TDC value} \leq 800$ の領域で得られたTDC分布として、

$$X = \frac{\int_{\text{TDC value}}^{800} \rho(T) dT}{\int_{600}^{800} \rho(T) dT} \times 5 \text{ mm} \quad (4.2)$$

の計算でドリフト距離 X を決定した。図4.6にX面のTDC分布から作成したX-T曲線を示す。

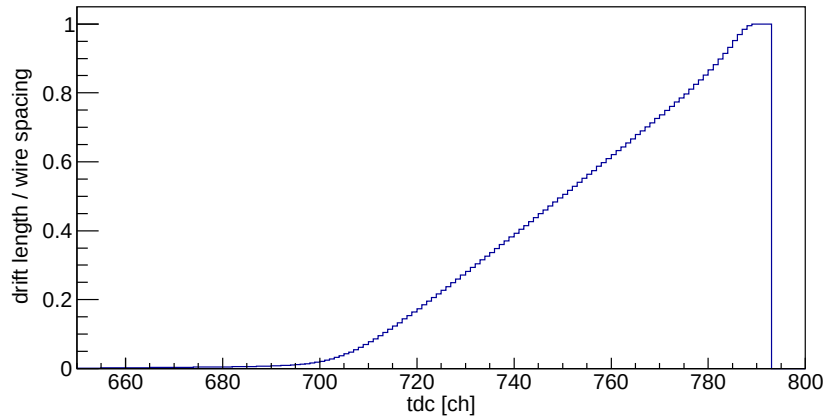


図4.6: X面で得られたX-T曲線。ドリフト時間の密度関数 $\rho(t)$ には多重度1以上のTDC分布(図4.5 赤線)を用いた。

4.3.2 直線でのトラッキング

MWDC1台の全9面のうち V' , V'' を除く7面全てにヒットがあったイベントについて、前節で作成したX-T曲線を用いてトラッキングを行った。各面のヒットを示したワイヤー毎にTDC値をX-T曲線変換することによりドリフト距離が与えられる。ヒット位置の候補としては、そのワイヤーに垂直な方向へ正に進むか負に進むかの2通りの選択肢がある。同一イベントに対する各面のヒット位置の候補はゆえに 2^7 通りある。これら全ての7点の組を最小二乗法で直線近似し、再構成したトラックの位置と、TDC時間情報をX-T曲線で変換して得られるヒット位置の残差の各面での二乗和が、最も小さくなる組み合わせで再構成したトラックを最終結果とした。

4.3.3 トラッキング性能の評価

トラッキング結果の各面における位置と、TDC値をX-T曲線を用いてドリフト距離に変換することにより推定したヒット位置の残差分布を図4.7に示す。ヒットのあった全ての面でトラッキングを行っているために残差の評価にはその面自体の推定ドリフト距離の影響が含まれていること、また V' , V'' を使用していないこ

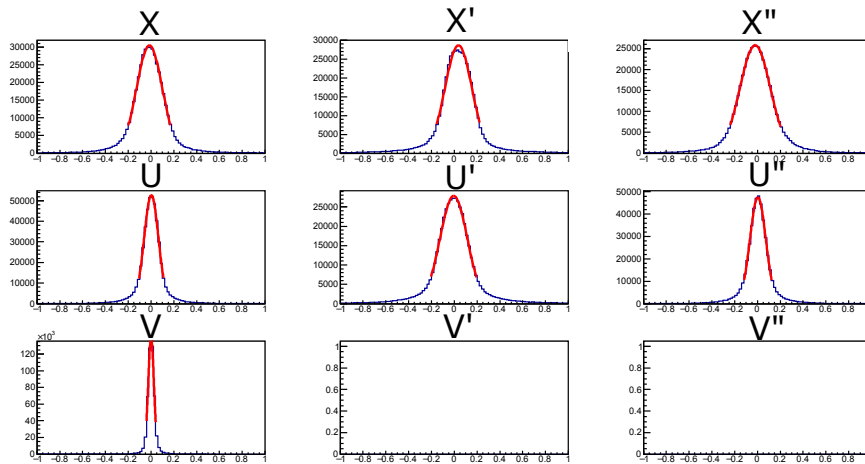


図 4.7: 各面でのトラッキング結果とヒット位置の残差二乗和分布. 横軸はトラッキング結果と TDC 値を X-T 曲線に変換したヒット位置との残差 [mm].

とにより、各面の残差分布に大きな差が見られるが、最大でも $336 \mu\text{m}/\text{面}$ (FWHM) となり、およそ目標を達成することができた。

上記のトラッキング性能の評価と同一の方法でビームタイム中にオンライン解析を行い、状況を把握していた。今回は、V 系列の面の故障により本 MWDC が備える性能を位置分解能、角度分解能として正しく評価するには至らなかった。しかし、DAQ とオンライン解析のシステムにより加速器実験が律速されるという事態には見舞われず、本番実験に耐えうる DAQ システムの開発という本論文の目標は達成されていることが確認できた。

4.4 ビーム実験における DAQ システムのテスト

最後に本研究で開発した DAQ システムを、ビーム実験に適用して得られた結果について述べる。

4.4.1 レート耐性の評価

開発した DAQ システムのビーム実験下でのトリガーレート耐性評価を行った。今回のビーム実験において 64ch RAINER ボードは、3 章の性能評価において最もデータ収集効率が高いことが確認された、SUPPRESS モードで Nagle アルゴリズムを使用する設定でのみ使用した。そのため 1 イベント毎に 64ch RAINER 4 台が読み出すデータサイズは、最大で 204 バイト (ヘッダー 16 バイト $\times$ 4 台 + 10 バイト (TDC 2nd ヒット込) $\times$ 7 面 $\times$ 2 ワイヤ) であった。尚、VME モジュールの 1 イベント毎の読み出しデータサイズは、RPV100 が 32 バイト、V792 が 72 バイト、V1290 が 148 バイト、RM が 12 バイトの計 264 バイトであった。64ch RAINER 4 台と VME を同時に読み出しを行った場合には、7 kHz のリクエストトリガーに対して、約 30% のデータ取得効率を達成した。また 64ch RAINER 4 台のみで $5 \mu\text{s}$ の不感時間を設定してデータを babir1 を用いて取得した場合には、21 kHz のリクエストトリガーに対して、約 90% のデータ取得効率を実現できた。この結果は、VME の読み出し不感時間が合わせて $360 \mu\text{s}$ 程度であったことを意味する。これは、3.2.1 節で評価された VME 読み出し不感時間とトリガーレートの関係と一致している。

4.4.2 イベント同期の評価

本番を想定したビーム実験において、64ch RAINER ボードで読み出した MWDC の信号と VME モジュールで読み出したプラスチックシンチレータの信号でイベント同期ができているかどうかを確かめた。まず、STM から配布されるトリガータグ情報の確認を行った。但し、64ch RAINER-VME 間のイベント照合には、VME スケーラーで読み出したアクセプトトリガーとクロックの情報を補助的に用いた。イベントの不一致が発生していなかったことを保証するために、取得したデータの全イベント数がアクセプトトリガーのカウントの増分と一致し、またアクセプトトリガーのカウント番号とクロックのカウントの昇順に入れ替わりが無いことを確認した。さらに、MWDC から求められるビームの位置情報と両読みシンチレータの左右でのシンチレーション光信号の到達時間差から推定されるビームの位置情報に相関があるかを調べた。図 4.9 は、MWDC から求めた粒子の飛跡とシンチレータの交点を横軸に、2 つの PMT で検出した信号の時間差を縦軸に取ったものである。シンチレーション光がシンチレータ両端に到達するまでの時間差が、シンチレータ中央からの距離として、MWDC によるトラッキング結果から導かれるシンチレータ上の位置と正しく相関を持つことがうかがえる。以上により、システムの内外の両方からイベント照合を行い、今回開発した DAQ システムの健全性を示すことができた。また、イベント同期が正しく行えていない場合との比較のために、64ch RAINER ボードと VME モジュールで読み出したイベントを 1 イベント分だけずらして相関を取ったものを図に示す。但し、MWDC のトラッキングについては正しく行うために、64ch RAINER ボード間のイベントはずらしていない。ネットワーク分散型の DAQ システムにおいて、システムを構成する読み出しフロントエンドのうち 1 つでもイベント構築に障害が起これば、システム全体の信頼性が損なわれることがよくわかる。

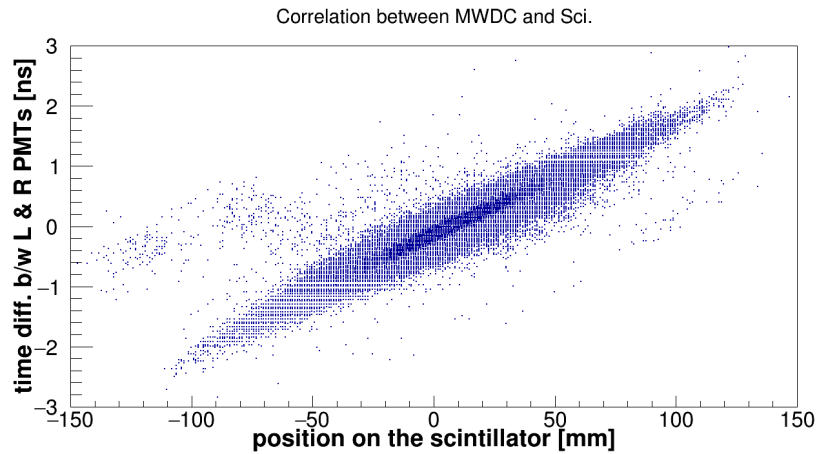


図 4.8: MWDC を用いて再構成したプラスチックシンチレータ上の陽子のヒット位置 (横軸) とシンチレータ両端の PMT で受信した信号の時間差 (縦軸). トラッキングした軌跡のシンチレータ上の位置とシンチレーション光が左右の PMT へ到達した時間差が線型な相関を持つことが確認できた.

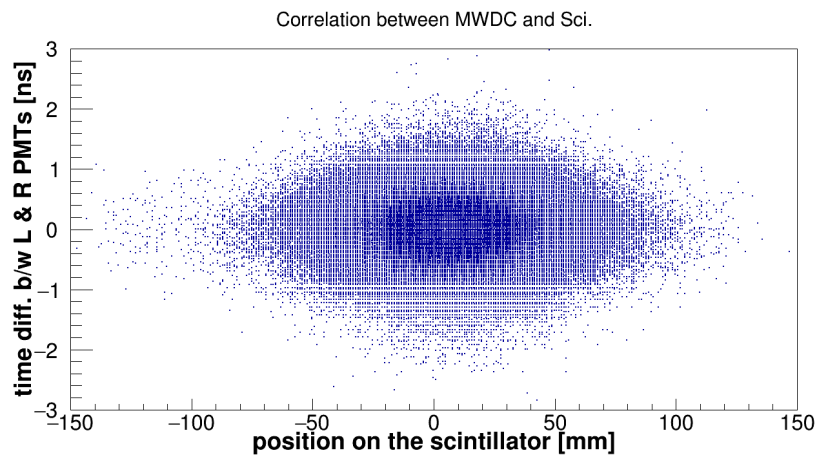


図 4.9: 64ch RAINER と VME でイベント番号を 1 つだけずらした場合の MWDC を用いて再構成したプラスチックシンチレータ上の陽子のヒット位置 (横軸) とシンチレータ両端の PMT で受信した信号の時間差 (縦軸). 図 4.9 と同じデータについてトラッキングしたイベントとシンチレーション光を検出したイベントを 1 イベント分だけずらした. 図 4.9 で確認できた線型相関が, 64ch RAINER と VME ので読み出すイベントの同期に失敗することで失われることが実証された.

第 5 章

まとめと今後の展望

今回、RIBF において計画されている二重ガモフテラー巨大共鳴探索と π 中間子原子分光の 2 つの実験に向けて、質量欠損分光に用いるドリフトチェンバー読み出し系の開発を行った。完成した 64ch RAINER-VME 統合 DAQ システムは、3 MB/s のデータ転送に対し 75% のデータ収集効率を実現した。このときの不感時間は $330 \mu\text{s}$ であった。またビーム実験において 1 kHz のトリガーレートの下で取得した 50 万イベントのデータについてイベント同期していることを確認した。この性能は、SRC から供給される大強度ビームを用いる両実験で想定されるトリガーレートに対し、73% 以上のデータ取得効率に相当する。同時に、BigRIPS において分散整合ビームラインの調整を行う際に必要なオンライン解析に基づくビーム位相のフィードバック制御のための全検出器統一 DAQ システムへの道筋も拓いた。さらに、読み出しモジュール単位に DAQ を並列化し、veto 管理とトリガータグの分配を行うことにより、確実に不感時間の削減とイベント同期の両立が実現されることを提示できた。

今回更新した MWDC 読み出し系に使用されている SiTCP は、ギガビット通信を FPGA 上で実現する次世代の高速データ転送ツールとして他にも多くの読み出しモジュールで採用されている。本研究で開発した DAQ ミドルウェアは、ソケットプログラミングの標準関数のうちのソケット作成・接続・破棄のみで構成されており、SiTCP 標準フレームワークを変更していない。そのため、SiTCP を搭載した他モジュールにも本 DAQ ミドルウェアは適用できる。その他の DAQ 高速化への将来的なアプローチとして、マイクロコンピュータによる VME モジュール単位での読み出しへの移行が進んでいる。RIBF が本来不安定核ビームを用いた稀少な反応の測定を行い、原子核研究の発展を促すための施設であることを考えると、既存の資産の最大限の活用と本研究の成果の導入により、高統計測定の実現に向けての可能性が上がり、また開発コストが下がった点において本研究結果は貢献できる。

現在、DAQ システムの性能を律速しているのはトリガーレートに依存する VME モジュール単体の不感時間である。64ch RAINER ボードと同じく SiTCP を実装可能で、VME-RM のように ADC や TDC で機能毎に分割されたメザニンボードを搭載することができる COPPER ボード [36] が J-PARC で開発されている。既存の VME モジュールを COPPER ボードなどに切り替え、64ch RAINER と同じくボード毎にネットワーク転送を行うことにより、今後更なる DAQ 高速化の実現が見込まれる。

謝辞

本論文の研究にあたり、多くの方々にお世話になりました。

指導教官である川畑貴裕 准教授，藤岡宏之 助教には RIBF における二つの実験に携わる貴重な機会をいただきました。「原子核とハドロンの分野間に壁を作らない」という藤岡助教の研究に対するポリシーに感銘を受け，本研究グループに属する決心をした僕にとって非常に理想的な環境の中で，モチベーションを高く保ちながら研究開発に取り組むことができました。お二人には，本論文の添削も丁寧にしていただき，その都度的確なご指摘を賜りました。

同研究室の永江知文 教授には研究の進捗についてよく気にかけてくださいました。研究を行う上での心構えについてもご提示いただき，研究開発の方向と位置を意識することを心がけることにより修士論文を完成させることができました。成木恵 准教授には開発内容や理研での生活について助けとなるアドバイスをいただきました。村上哲也 講師には発表練習の際に，研究の方針に関して鋭い視点で質問していただき，研究について根幹から見直すことができました。新山雅之 助教には素粒子・原子核実験やカイラル対称性をテーマとしたゼミの議論に参加していただいたおかげで，自身の誤った認識を正すことができました。

理研での開発にあたっては，板橋健太 岩崎先端中間子研究室専任研究員，西隆博 上坂スピン・アイソスピン研究室特別研究員からは研究課題設定から本論文執筆に至るまでの全ての段階において多くのご指導を賜りました。板橋研究員には研究を進める上で取るべき考え方と，そのために必要な情報と能力についていつも示していただきました。西研究員にはハードウェアの取り扱いと解析において豊富な経験と知識から実験物理学者としての素養を吸収させていただきました。お二人の御指導，叱咤，激励がなければ，本研究の課題達成とその結果を本修士論文にまとめることはできませんでした。深く感謝申し上げます。

DAQ 開発においては，仁科加速器センター情報処理技術チームの馬場秀忠 研究員から技術的サポートを賜りました。ソフトウェア開発の経験のない僕が理解できるまで，一般的な DAQ の知識から RIBF DAQ システムの全体像と仕様について説明していただきました。システムのデバッグに行き詰った際には，問題の原因を特定するためのアプローチや便利なツールを提示いただき，解決することができました。また，新規モジュールを導入する度にシステム環境セットアップにお力添えいただきました。

二重ガモフテラー巨大共鳴探索実験グループの上坂友洋 主任研究員，矢向謙太郎 東京大学原子核科学研究センター准教授，同研究室高木基伸さんには，研究の進行に合わせた的確な助言と展望を与えていただきました。CYRIC における MWDC 系のテスト実験に参加，ご協力いただいた銭廣十三 上坂研研究員からは，状況把握に必要な実験データセットとその見方について，その得られた情報から次の判断を下すまでの一連の作業の中で学ばせていただきました。

中間子原子・原子核実験グループの方々にもお世話になりました。田中良樹さんとは将来実験や本修士論文についてグループで議論する中で様々な観点から必要な確認事項を洗い出していただき，物事を多角的に捉えることの重要性を身を以て教えてくださいました。渡辺珠以さんには MWDC の原理から開発内容について丁寧に説明して下さった他，CYRIC におけるテスト実験の際にはオンライン解析コードの整備を全面的にサポートしていただきました。阪上朱音さんには同研究室の先輩として修論研究の進捗に気を配っていただいた

上、CYRIC 実験の準備に駆けつけてくださいました。

また研究室では多くの同輩に恵まれ、互いに切磋琢磨、励まし合いながら研究生生活を送ることができました。足利沙希子さん、市川真也くん、稲葉健斗くん、越川亜美さん、高橋祐羽くん、武田朋也くん、渡邊憲くんとは学部卒業研究のころからの付き合いですが、それぞれが個性豊かで、各人の研究内容やその中での問題点について素朴な疑問を投げ合って議論し、修士課程進学時には想像もしなかった楽しい一時を共に過ごすことができました。

岩崎研の皆様にも大変お世話になりました。岩崎雅彦 主任研究員には研究室の身分を持たない僕に開発室兼会議室を居室として提供していただき、グループでの議論を円滑に行える素晴らしい環境の下で研究を進めることができました。秘書の山本光枝さん、岩浪僚子さん、浅川典子さんには、慣れない長期出張における体調面にお気遣いいただき、快適に理研での生活が送れるよう手配してくださいました。基礎科学特別研究員の神田聡太郎さんには FPGA の実装方法を教えていただき、大学院生リサーチ・アソシエイトの相川脩さん、田中慎太郎さんとは研究室のイベントや休憩の合間に岩崎研や互いの実験グループの活動について談笑し、楽しく過ごすことができました。国際プログラム・アソシエイトの方々との交流も、文化の違いはもちろん、その中でも共通した習慣があることを知ることができ、非常に刺激的でした。

東邦大学 4 年生の三輪海彩さんには MWDC の動作立ち上げからテスト実験までの作業に参加し、手を貸していただいたおかげで、CYRIC 実験を無事に乗り越えることができました。

その他にもここには書ききれない多くの方々のご協力、応援により本研究を論文として仕上げることができました。深く感謝申し上げます。

最後に、いつも温かい目で遠くから見守ってくれた家族に、この場を借りて感謝の気持ちと御礼を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Muto, Phys. Lett. B **277** (1992) 13.
- [2] T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Rep. **247** (1994) 221.
- [3] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122** (1961) 345.
- [4] W. Weise, Nucl. Phys. A **553** (1993) 59.
- [5] T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R. S. Hayano, and H. Toki, Phys. Rep. **514** (2012) 1.
- [6] N. Ikeno, Doctoral thesis, Nara Women's University (2014).
- [7] M. Ericson and T. E. O. Ericson, Ann. of Phys. **36** (1966) 323.
- [8] M. Gell-Mann, R. Oakes and B. Renner, Phys. Rev. **175** (1968) 2195.
- [9] Y. Tomozawa, Nuovo Cim. **46A** (1966) 707.
- [10] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **17** (1966) 616.
- [11] D. Jido, T. Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Lett. B **670** (2008) 109.
- [12] Y. Umemoto, S. Hirenzaki, K. Kume and H. Toki, Phys. Rev. C **62** (2000) 024606.
- [13] K. Itahashi *et al.*, Phys. Rev. C **62** (2000) 025202.
- [14] K. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 072302.
- [15] N. Ikeno *et al.*, Prog. Theor. Phys. **126** (2011) 483, and private communication.
- [16] S. Terashima *et al.*, Phys. Rev. C **77** (2008) 024317.
- [17] T. Nishi *et al.*, arXiv:1708.07621v1 [nucl-ex] (2017).
- [18] T. Nishi, Doctoral thesis, University of Tokyo (2015), and private communication.
- [19] N. Ikeno *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013** (2013) 63D01.
- [20] M. Takaki *et al.* CNS annual report (2011).
- [21] H. Miya *et al.* Nucl. Inst. Meth. B **317** (2013) 701.
- [22] T. Nishi *et al.* Nucl. Inst. Meth. B **317** (2013) 290.
- [23] H. Kumagai *et al.* Nucl. Inst. Meth. A **470** (2001) 562.
- [24] H. Yamakami, Master's thesis, Kyoto University (2015).
- [25] 64ch RAINIER MODEL RPR-010, REPIC CORPORATION
URL: <https://www.repic.co.jp/product/module/general/rpr-010.html>
- [26] N. Taniguchi *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A **732** (2013) 540.
- [27] KEK-AMS-TDC-VME
URL: <http://atlas.kek.jp/tdc/AMT-VME/umannual-j.pdf>
- [28] T. Uchida, IEEE Trans. Nuc. Sci. **55**, 3 (2008) 1631
- [29] SiTCP 説明書
URL: <http://research.kek.jp/people/uchida/technologies/SiTCP/doc/SiTCP.pdf>
- [30] J. Nagle, Congestion Control in IP/TCP Internetworks, RFC **896** (1984).

- [31] Y. Igarashi *et al.* IEEE Trans. Nuc. Sci. **57**, 2 (2010) 618.
- [32] VME-RM マニュアル
URL: http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/moritsu/others/VMERM_manual_v01.pdf
- [33] RIBFDAQ DAQ/Manual/Utility
URL: <https://ribf.riken.jp/RIBFDAQ/index.php?DAQ%2FManual%2FUtility>
- [34] H. Baba *et al.* Nucl. Inst. Meth. A **616** (2010) 65.
URL: <http://ribf.riken.jp/RIBFDAQ/index.php?DAQ%2FInformation%2FSoftware>
- [35] H. Baba *et al.* RIKEN Accel. Prog. Rep. **50** (2017) 224.
- [36] Y. Igarashi *et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci. **52** (2005) 2286.

付録 A

新規 MWDC について

A.1 低圧 MWDC

これまでの piAF 実験では、1 気圧のガス圧で MWDC を使用していたため、F5 真空層入口にビームラインと真空を切る窓として 50 μm 厚の SUS を設置した結果、多重散乱による角度散逸が 2 mrad (σ) を超える角度分解能の悪化を招いていた。さらに使用していたビームライン光学系の高次収差により、運動量分散焦点面が MWDC のワイヤー面から約 87° 傾いていたため、粒子のヒット位置によって焦点面まで外挿する距離が異なり、図 A.1 左側に示すようにエネルギー分解能に位置依存性が生じていた。この MWDC が備える飛跡再構成の性能による焦点面上の位置分解能はおよそ 0.1 mm (FWHM) であったが、上述の多重散乱と光学収差を合わせた効果により、最終的な焦点面上の位置分解能は、2 次の位置依存性を持ち、最大 4.1 mm (FWHM) にまで悪化した。そこで、既に東京大学原子核科学研究センターにおいて開発されている低圧 MWDC [21] を採用することにより、余計な物質厚による問題を解消する。MWDC の内部ガス圧を下げることで真空窓を取り除き、図 A.1 右側のように分解能の位置依存性を低減させる。

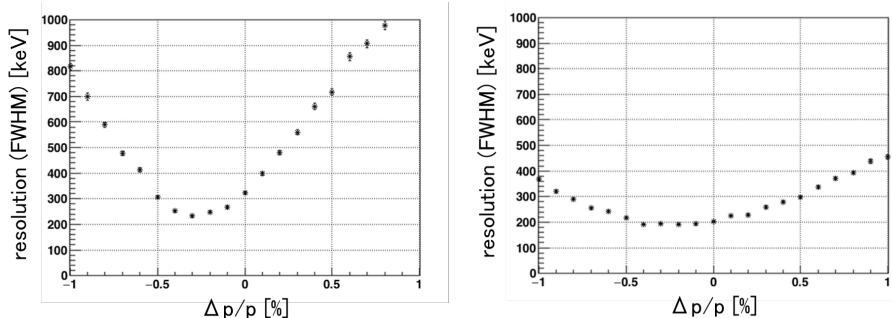


図 A.1: エネルギー分解能の運動量分散による変化. 真空窓における多重散乱により、傾いた焦点面上では角度散逸の効果が運動エネルギー分解能に位置依存性を生じさせた [18]. 新たに開発した低圧 MWDC により、トラッキングする粒子の通過する物質厚が減少し、分解能の位置依存性を抑制することができる。

A.2 三面交替 MWDC

新たに開発した MWDC は 1/3 セルずつ移し替えた 3 面 1 組の層をそれぞれ相対的に 30° ずつ傾けた X-X'-X''(0°), U-U'-U''(+30°), V-V'-V''(-30°) の 9 面で構成される。先行実験で用いられた MWDC は図 A.2 上側に示す 2 面交替の構造を持ち、位置スペクトルに図 (A.3) [18] 上側のようなワイヤー配置に起因する構造

が現れた。先行研究はエネルギー分解能が平均 300 keV であったため、図 A.3 下側のようにスペクトルを 130 keV の標準偏差の正規分布で鈍しても分解能への影響は無視できたが、高精度測定を目標とした本研究ではこの問題を避けなければならない。

MWDC では粒子の飛跡を再構成する際に、各面でのヒット位置のセンスワイヤーからの距離を、電子のドリフト時間から変換したドリフト距離によって評価する。この X-T 曲線を作成するためのイベントをセル毎に選ぶための境界条件として、一般的にドリフト距離がセルサイズ内に収まるような境界条件を採る。しかし実際には TDC の時間分解能の分だけ幅をもっているため、この評価は厳密には正しくない。図 A.3 のスパイク構造は、ワイヤー近傍の解析において、測定されたドリフト時間から推定されるドリフト長の確率分布が、ワイヤー区間の境界条件から切り落とされることで、図 A.2 上側に示すように、ヒット位置の期待値が必ずワイヤーから離れる方向にずれてしまうために発生する。そこで、図 A.2 下側に示すこのような 3 面交替のワイヤー構造を持つ MWDC を使い、粒子飛跡がワイヤーに最も近かった面を除いて粒子軌跡を求める。ワイヤー近傍の解析を意図的に避けることができるワイヤー配置を採り、スペクトルにワイヤー構造が出現する効果を抑える。

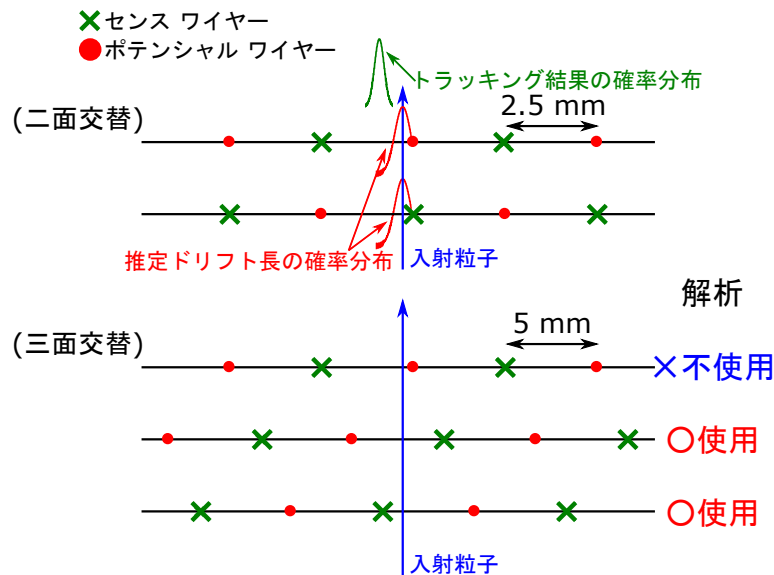


図 A.2: MWDC ワイヤー構造. 粒子がワイヤー付近を通過した場合、TDC 時間情報から推定されるドリフト長分布の裾はセルサイズを超える。X-T 曲線をセルサイズ内でヒットしたイベントのみから作成する際、ワイヤー付近のドリフト長分布はセル内で定義されるため、トラッキング結果は真の位置からワイヤーを避ける方向にバイアスを受ける。二面交替構造を用いた場合はワイヤー付近のトラッキング解析を避けられないが、三面交替構造を用いた場合はワイヤー最近接のヒットについて解析を行わずにトラックを引くことができる。

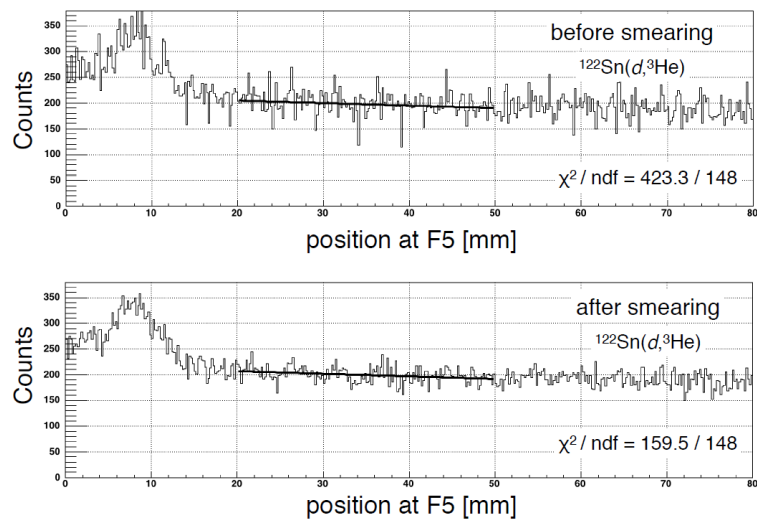


図 A.3: ワイヤ構造を反映したスペクトルの歪み [18]. 二面交替構造の MWDC を用いた先行研究ではワイヤ付近のヒットの解析の際に生じるバイアスにより、再構成した粒子の位置スペクトルにスパイク構造が現れた. 先行研究ではこのスパイク構造をエネルギー分解能の許す範囲で鈍し、この問題を回避したが、計画している高分解能測定ではこの手法により測定精度が決定される.