

修士学位論文

# Belle II 実験 ARICH 検出器のための 異常検知システムの開発

指導教員: 角野 秀一  
首都大学東京 理学研究科

物理学専攻 高エネルギー実験研究室  
博士前期課程 2 年

学籍番号 18844416  
小林将騎

2020 年 1 月 10 日

## 概要

Belle II 実験は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われており, SuperKEKB 加速器で加速した電子-陽電子を衝突させることで B 中間子を大量に生成し, その崩壊過程に含まれる稀な事象を測定することで新物理の探索を行う. その測定を行う Belle II 測定器は, 複数の検出器によって構成されており, そのエンドキャップ部で新物理探索に感度がある崩壊モードに多く含まれる荷電  $K$  中間子と荷電  $\pi$  中間子の識別を行う装置が ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) 検出器である.

高精度の新物理探索のためには Belle II 測定器の長期安定運用が必要であり, 突発的な故障が生じた際は早急な対応が必要である. しかし ARICH 検出器は 420 台の HAPD とその読み出し回路から構成され, 高電圧電源を含め大量の情報を常時監視する必要がある. 本研究では検出器の異常を早期に検出する自動異常検知システムの開発を行った. 本システムでは ARICH 検出器で使用する光検出器の電圧や電流, 読み出し回路の温度のモニター値を設定した閾値と比較することで異常を素早く検知し, また対応を行うために必要な情報を提供する.

本システムは 2019 年の春と秋の実験期間にて運用を行った. 秋の実験期間においては 1 件の重大な異常を検出することができた. また, 検出した異常は電子メールでアラートとして通知を行い, メールには異常に対応するのに必要な情報として異常が生じたチャンネルの時間変動をブラウザ上で閲覧できるシステムを開発した.

異常が検出されたチャンネルだけではなく, 全チャンネルの時間変動を見ることのできるウェブインターフェースを開発し, KEK 外にいる ARICH グループの関係者も過去のモニター値の時間変動を確認できるようになった.

本論文では ARICH 検出器異常検知システムの実装に関する詳細と 2019 年の運用実績について述べる.

# 目次

第 1 章	序論	7
1.1	Belle II 実験の目的	7
1.1.1	標準模型	7
1.1.2	CP 対称性の破れ	8
1.1.3	B 中間子の物理	9
第 2 章	SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器	15
2.1	SuperKEKB 加速器	15
2.2	Belle II 測定器	16
2.2.1	VXD (PXD, SVD)	17
2.2.2	CDC	18
2.2.3	TOP	21
2.2.4	ARICH	22
2.2.5	ECL	23
2.2.6	KLM	24
2.2.7	データ収集システム:DAQ	25
2.2.8	運用体制	27
2.3	BelleII 実験の現状及び見通し	28
第 3 章	ARICH 検出器	31
3.1	ARICH の粒子識別原理	31
3.2	ARICH の構成	33
3.2.1	輻射体:シリカエアロゲル	34
3.2.2	光検出器:HAPD	36
3.2.3	読み出しシステム	38

3.2.4	電源装置 . . . . .	39
3.2.5	冷却装置 . . . . .	41
3.2.6	ARICH slow control . . . . .	41
3.3	運用体制 . . . . .	41
3.4	本研究の目的 . . . . .	43
<b>第 4 章</b>	<b>検出器監視システムの開発</b>	<b>44</b>
4.1	ARICH の状態 . . . . .	44
4.2	システム構造 . . . . .	48
4.3	アラートメール . . . . .	48
4.3.1	ウェブインターフェイス . . . . .	49
4.3.2	メール上の情報 . . . . .	50
4.4	システム実装 . . . . .	51
4.4.1	2019 年春の実験期間 (2019a) での実装 . . . . .	53
4.4.2	2019 年秋の実験期間 (2019c) での実装 . . . . .	56
<b>第 5 章</b>	<b>ARICH の長期安定性可視化の開発</b>	<b>61</b>
5.1	目的 . . . . .	61
5.2	ウェブインターフェイス上での可視化 . . . . .	61
5.3	モニター値の長期的な変動 . . . . .	63
5.3.1	異常検知されたチャンネルの変動 . . . . .	65
5.3.2	モニター値データ解析 . . . . .	67
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>70</b>
	<b>参考文献</b>	<b>72</b>

# 図目次

1.1	高エネルギー加速器研究機構 空中写真 . . . . .	8
1.2	素粒子標準模型 . . . . .	9
1.3	ユニタリティー三角形 . . . . .	10
1.4	box diagram . . . . .	11
1.5	B 中間子崩壊の模式図 . . . . .	11
1.6	$B \rightarrow hh$ 崩壊のダイアグラム . . . . .	13
1.7	$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の期待される $\Delta E$ 分布 . . . . .	14
1.8	FCNC 過程のファイマンダイアグラムの一例 . . . . .	14
2.1	SuperKEKB 加速器 . . . . .	15
2.2	ナノビーム方式のビーム衝突 . . . . .	17
2.3	Belle II 測定器 . . . . .	18
2.4	Belle II 測定器 配置図 . . . . .	19
2.5	崩壊点検出器の層構造 . . . . .	20
2.6	CDC 運動量とエネルギー損失の関係 . . . . .	21
2.7	CDC におけるワイヤーの配置 . . . . .	22
2.8	TOP モジュール . . . . .	22
2.9	TOP の検出原理概念図 . . . . .	22
2.10	ECL のエネルギー分解能と時間分解能 . . . . .	23
2.11	ECL の断面図 . . . . .	24
2.12	KLM で採用されたプラスチックシンチレータ . . . . .	25
2.13	DAQ の概要図 . . . . .	26
2.14	Slwo control system の概要図 . . . . .	27
2.15	slow control network . . . . .	27
2.16	Belle II 実験のルミノシティの見通しと期待される物理モード.[19]. . . . .	29

3.1	ARICH 検出原理 イメージ図 . . . . .	32
3.2	ARICH チェレンコフ角分布 . . . . .	32
3.3	HAPD 層とエアロゲル層の構造体ドッキングの様子 . . . . .	33
3.4	ARICH 構造図 . . . . .	34
3.5	ARICH 構成要素間の配置 . . . . .	34
3.6	エアロゲルの写真 . . . . .	35
3.7	デュアルレイヤー方式 . . . . .	35
3.8	HAPD のデザイン . . . . .	37
3.9	HAPD の内部構造 . . . . .	37
3.10	青色 LED で HAPD にパルス光を当てた時の波高分布 . . . . .	38
3.11	読み出し回路 . . . . .	39
3.12	HAPD 番号付け . . . . .	40
3.13	MGR 番号付け . . . . .	40
3.14	ARICH のネットワークマップ . . . . .	42
3.15	slow control の制御通信プロトコル . . . . .	42
4.1	異常検知システム 概念図 . . . . .	45
4.2	異常が生じる場合のイメージ図 . . . . .	46
4.3	slow monitor におけるデータの流れ . . . . .	49
4.4	PV の命名規則 . . . . .	50
4.5	メールがユーザに来るまでの流れ . . . . .	51
4.6	jsroot による表示の例 . . . . .	52
4.7	アラートメール表示 . . . . .	52
4.8	2019a 期間における閾値の決め方 . . . . .	55
4.9	最終的な閾値一覧 . . . . .	59
4.10	アラートメール送信頻度 . . . . .	60
4.11	電圧の異常な低下 . . . . .	60
5.1	ヒストリー作成の概要図 . . . . .	62
5.2	作成したウェブページ . . . . .	63
5.3	作成したウェブページ サマリーページ . . . . .	64
5.4	モジュール番号 1 の HAPD の印加電圧値の時間変動 . . . . .	65
5.5	モジュール番号 1 の HAPD の電流値の時間変動 . . . . .	66

5.6	モジュール番号 1 に接続されている読み出し回路の温度の時間変動 . . .	66
5.7	特に電流値の不安定なチャンネル . . . . .	67
5.8	各 type ごとのモニター値分布 . . . . .	68
5.9	平均値の高いチャンネル一覧 . . . . .	69
5.10	読み出し回路の温度のモニター値分布 . . . . .	69

# 表目次

1.1	$B \rightarrow hh$ の崩壊モードとそのダイアグラムおよび崩壊分岐比の計算および測定結果 . . . . .	12
2.1	KEKB と SuperKEKB の基本パラメータ . . . . .	17
2.2	Belle II 実験 計画 . . . . .	29
2.3	2019 年 年表 . . . . .	30
3.1	LV 設定電圧一覧 . . . . .	39
4.1	モニター値の変化と考えられうる異常 . . . . .	47
4.2	メールに添付される情報一覧 . . . . .	53
4.3	リファレンスデータの取得状況 . . . . .	55
4.4	例外的に設定した閾値 . . . . .	57
4.5	Information レベルの異常のログ数 . . . . .	58



# 第 1 章

## 序論

茨城県つくば市に所在する高エネルギー加速器研究機構 (KEK) (図 1.1) において 1999 年から 2011 年にかけて Belle 実験が行われた。この実験は電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である KEKB 加速器を用いて大量の B 中間子を生成し、その崩壊過程を Belle 測定器で観測することにより B 中間子系における CP 対称性の破れを検証し、小林・益川理論を証明した。またエキゾチックハドロンの発見も成果の一つである。その後の LHC による Higgs 粒子の発見によって標準模型は完成したが、ダークマターやダークエネルギーなど、標準模型では説明ができない物理事象の存在が示唆されている。Belle II 実験は検出器・加速器を Belle 測定器・KEKB 加速器からそれぞれ Belle II 測定器・SuperKEKB 加速器へと改良し、より多統計・高精度の測定による新物理の探索を目的とする実験である。

### 1.1 Belle II 実験の目的

この節では素粒子物理の概要及び Belle II 実験で発見が期待されている新物理について述べる。

#### 1.1.1 標準模型

標準模型 (図 1.2) は今日の素粒子物理学において最も確立された理論である。この理論は 4 つの基本的な相互作用のうち重力相互作用を除く強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の 3 つを記述する。標準模型において素粒子は物質を構成する粒子 (クォークとレプトン)、相互作用を媒介する粒子 (ゲージボソン)、質量を与えるヒッグス粒子がある。



図 1.1 高エネルギー加速器研究機構 空中写真

しかし、宇宙観測などから標準模型では説明できない現象の存在が示唆されており、それらを説明する理論として電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を統一する大統一理論や素粒子を 2 次元空間内で定義されたひもであると仮定する弦理論、超対称性粒子の存在を仮定する超対称性理論など様々なアイデアが提唱されているが、その確立には至っていない。

### 1.1.2 CP 対称性の破れ

素粒子物理学において基本的な変換として C 変換 (電荷共役変換), P 変換 (鏡像変換), T 変換 (時間反転) がある。ローレンツ不変な理論は 3 つの変換をすべて行う CPT 変換に対して対称であることが証明されている [2]。また CP 対称性は粒子-反粒子の対称性のことを指し、物質優勢宇宙の説明に必要なサハロフの 3 条件の 1 つにもなっている [3]。

CP 対称性の破れは 1964 年、Cronin, Fitch らによって  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$  崩壊から初めて観測された [4]。CP 対称性の破れの説明できる理論の一つとして 1973 年に小林誠と益川敏英によって小林・益川モデルが提唱された [5]。小林・益川モデルでは当時はまだ未発見だった第 3 世代のクォークの存在を仮定し、弱固有状態と質量固有状態の変換を表すユニタリ行列である Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列 (CKM 行列) が複素位相を含むことで自然に CP 対称性が破れることを説明した。弱固有状態 ( $d', s', b'$ ) と質量固有状態

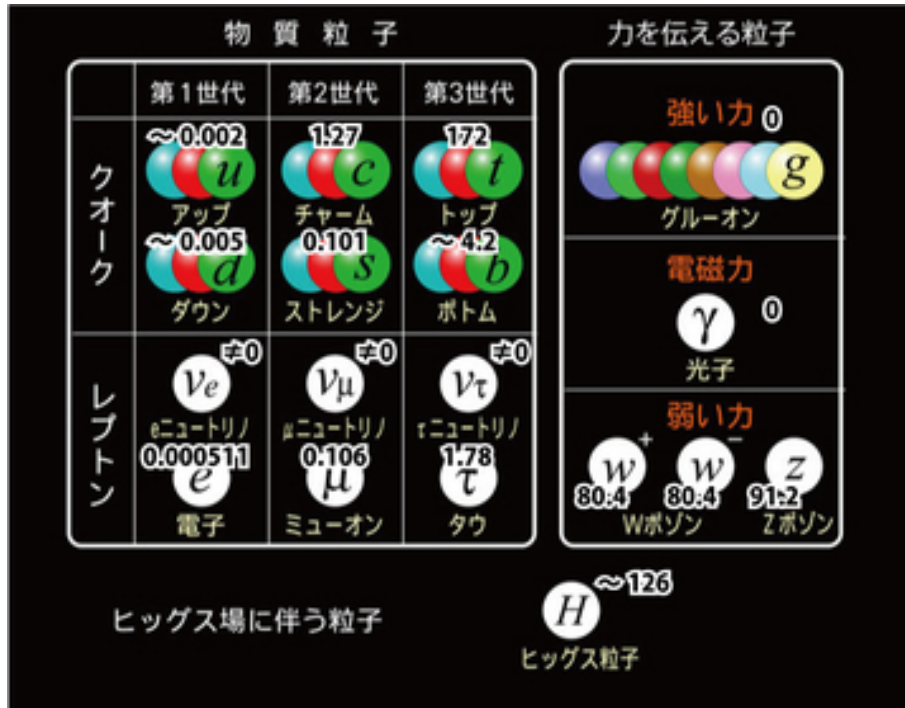


図 1.2 素粒子標準模型 [1] 数値は素粒子の質量 (単位 [GeV]) である.

$(d, s, b)$  の混合は以下のように表せる.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \equiv V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

この行列はユニタリ行列であるため, 以下の式が成り立つ.

$$V_{tb}^* V_{td} + V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} = 0. \quad (1.2)$$

各項を複素平面上的の矢印で表すとき, 3本の矢印をつなぐと三角形ができる (図 1.3). この三角形をユニタリティー三角形と呼ぶ. この三角形は各辺が行列の各要素の大きさに, 角度は要素の比に対応する. すなわち, 三角形の面積が CP 対称性の破れの大きさに比例する.

### 1.1.3 B 中間子の物理

Belle 実験や Babar 実験 [6] などの B ファクトリー実験では  $e^-e^+$  を衝突させることで生じた  $\Upsilon(4S) = (b\bar{b})$  の共鳴状態が  $B^0\bar{B}^0$  に崩壊することで B 中間子を生成する. よって

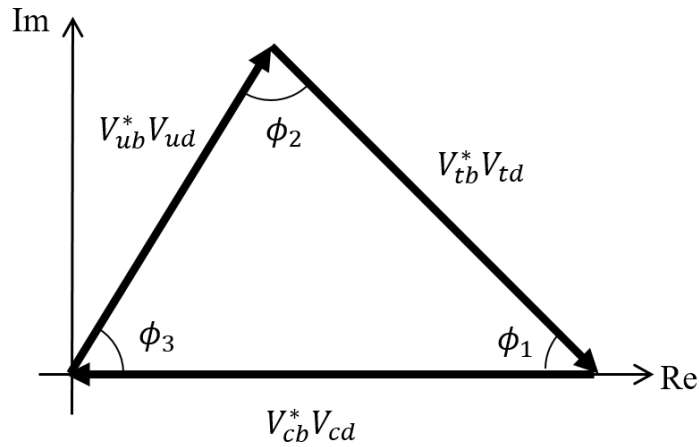


図 1.3 ユニタリティー三角形 三角形が閉じていれば小林・益川モデル (標準模型) は正しい

電子-陽電子ビームの衝突エネルギーは重心系で  $\Upsilon(4S)$  の質量, つまり  $10.58 \text{ GeV}/c^2$  になるように設定される. SuperKEKB 加速器では  $e^-$  は  $7.0 \text{ GeV}$ ,  $e^+$  は  $4.0 \text{ GeV}$  のエネルギーを持ち, 生成された  $B$  中間子対は  $3.0 \text{ GeV}$  程度の運動エネルギーを持つ.

$B^0, \bar{B}^0$  は理論的にお互いへの遷移が許されている. これを  $B^0 - \bar{B}^0$  混合と言い, その過程は box diagram(図 1.4) で記述される.

### CP 対称性の破れの測定

$\Upsilon(4S)$  からの崩壊でできた 2 つの  $B$  中間子は同時に  $B^0, B^0$  もしくは  $\bar{B}^0, \bar{B}^0$  をとることはできないため, B ファクトリー実験ではこれを利用して片方の  $B$  中間子の状態を  $B^0$  (もしくは  $\bar{B}^0$ ) 固有の崩壊を観測することでもう片方の  $B$  中間子の状態を特定する. またそれぞれの  $B$  中間子の崩壊点の差を観測することで, 以下の式,

$$\Delta t \sim \frac{\Delta z}{\langle \beta \gamma \rangle c}, \quad (1.3)$$

から寿命の差, すなわち CP 対称性の破れを測定できる (図 1.5).

### $B$ 中間子の崩壊分岐比を用いた新物理探索

標準模型の検証および新物理の探索に有効といわれている崩壊に  $B \rightarrow K\pi, \pi\pi, KK$  (まとめて  $B \rightarrow hh$  と呼ばれる) がある [8].  $B \rightarrow hh$  は 10 種類の崩壊モードがあり, ツリー (T), ペンギン (P), color-suppressed ツリー (C), color-suppressed electroweak ペンギン ( $P_{EW}^c$ ), electroweak ペンギン ( $P_{EW}$ ), W-exchange (E), annihilation (A), ペンギン

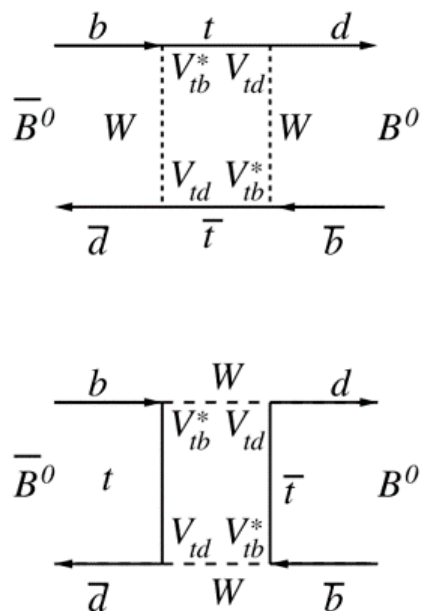


図 1.4 box diagram[7] :  $B^0 - \bar{B}^0$  混合のファインマンダイアグラム

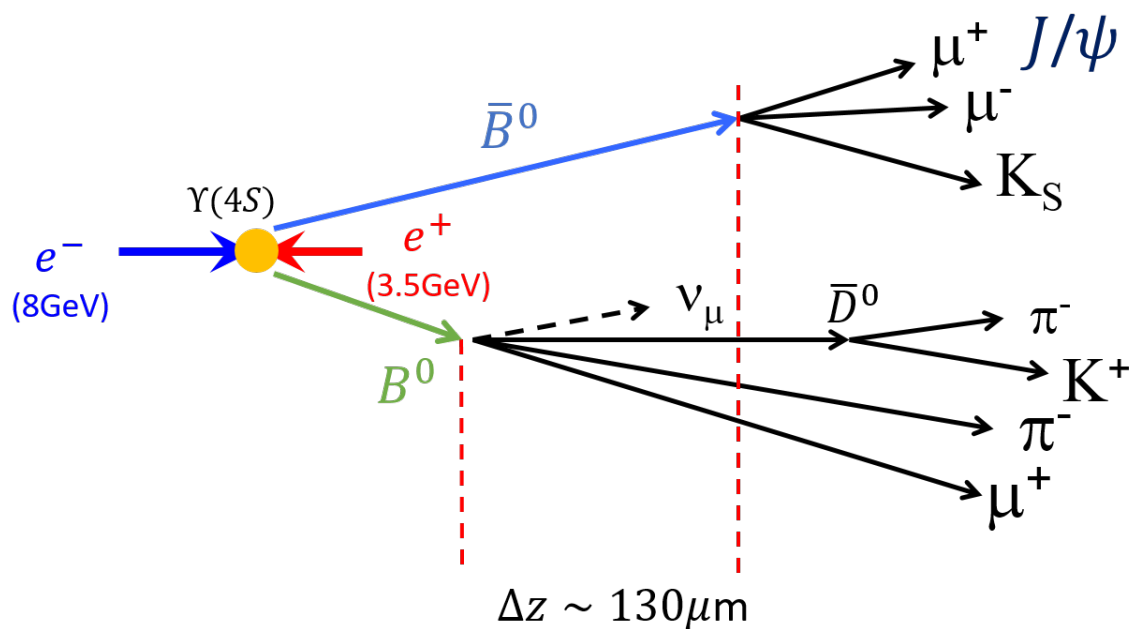


図 1.5 B 中間子崩壊の模式図

ン annihilation(PA) の 8 種類のダイアグラムの組み合わせとして考えられる. 表 1.1 に各崩壊モードのダイアグラムの組み合わせと崩壊分岐比の標準模型からの計算の一例および測定結果 [10]-[14] を表示し, また一部のファインマンダイアグラムを図 (1.8) に示す.

表 1.1  $B \rightarrow hh$  の崩壊モードとそのダイアグラムおよび崩壊分岐比の計算および測定結果

崩壊モード	ダイアグラム組み合わせ	分岐比 (理論)( $10^{-6}$ )	分岐比 (測定)( $10^{-6}$ )
$B^0 \rightarrow K^+\pi^-$	T+P+P <sub>EW</sub> <sup>c</sup>	$19.3^{+7.9}_{-4.8} \ ^{+8.2}_{-6.2}$	$19.9 \pm 0.4 \pm 0.8$
$B^+ \rightarrow K^+\pi^0$	T+P+C+P <sub>EW</sub> +P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +A	$12.5^{+4.7}_{-3.0} \ ^{+4.9}_{-3.8}$	$12.4 \pm 0.5 \pm 0.6$
$B^+ \rightarrow K^0\pi^+$	P+P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +A	$12.5^{+9.2}_{-6.0} \ ^{+6.9}_{-9.0}$	$22.8^{+0.8}_{-0.7} \pm 1.3$
$B^0 \rightarrow K^0 + \pi^0$	P+C+P <sub>EW</sub> +P <sub>EW</sub> <sup>c</sup>	$12.5^{+3.8}_{-2.2} \ ^{+3.8}_{-2.9}$	$8.7 \pm 0.5 \pm 0.6$
$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	T+P+P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +E+PA	$7.0^{+0.4}_{-0.7} \ ^{+0.7}_{-0.7}$	$5.1 \pm 0.2 \pm 0.2$
$B^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$	T+C+P <sub>EW</sub> +P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +A	$5.9^{+2.2}_{-1.1} \ ^{+1.4}_{-1.1}$	$6.5 \pm 0.4 \pm 0.4$
$B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$	P+C+P <sub>EW</sub> +P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +E+PA	$1.1^{+1.0}_{-0.4} \ ^{+0.7}_{-0.3}$	$1.1 \pm 0.3 \pm 0.1$
$B^0 \rightarrow K^+K^-$	E+PA	$0.10^{+0.03}_{-0.02} \ ^{+0.03}_{-0.03}$	$< 0.41$
$B^+ \rightarrow \bar{K}^0 K^+\pi^+$	P+P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +A	$1.8^{+0.9}_{-0.5} \ ^{+0.7}_{-0.5}$	$1.22^{+0.32}_{-0.28} \ ^{+0.13}_{-0.16}$
$B^0 \rightarrow \bar{K}^0 K^0$	P+P <sub>EW</sub> <sup>c</sup> +PA	$2.1^{+1.0}_{-0.6} \ ^{+0.8}_{-0.6}$	$0.87^{+0.25}_{-0.20} \pm 0.09$

ツリーダイアグラムでは  $b \rightarrow u$  遷移による崩壊振幅に  $V_{ub}$  が入ってくるため, ユニタリティー三角形の  $\phi_3$  の情報が含まれている. ペンギンダイアグラムではループ部分に新粒子が寄与すれば崩壊分岐の標準模型からのずれを測定することで新物理の情報が期待できる. また, 終状態が CP 固有状態である場合は  $B^0 - \bar{B}^0$  混合による間接的 CP 対称性の破れの測定が原理的に可能であり,  $B^0 \rightarrow K^0\pi^0, \bar{K}^0 K^0, K^+K^-$  は  $\phi_1$ ,  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-, 2\pi^0$  からは  $\phi_2$  の情報が得られる. B 中間子の崩壊による直接的 CP 対称性の破れの測定は  $B \rightarrow hh$  の全ての崩壊で測定が可能になっている.

このように  $B \rightarrow hh$  崩壊では様々なパラメータの情報が期待できるが, 崩壊分岐比が非常に小さく,  $K/\pi$  を高い精度で識別する必要がある.

他にも,  $K/\pi$  識別が重要になる例として  $B^0 \rightarrow \rho\gamma$  と  $B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$  が挙げられる. これはそれぞれ  $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$  と崩壊するため二つの崩壊を区別が正確にできるようになるためには高い運動量領域での  $K/\pi$  識別が必要となる (図 1.7). これらの崩壊モードは FCNC(Flavor Changing Neutral Current) 過程であるためループを介して発生し, 新物理に感度があると期待される (図 1.8). なお図 1.7 での横軸  $\Delta E$  はビームエ

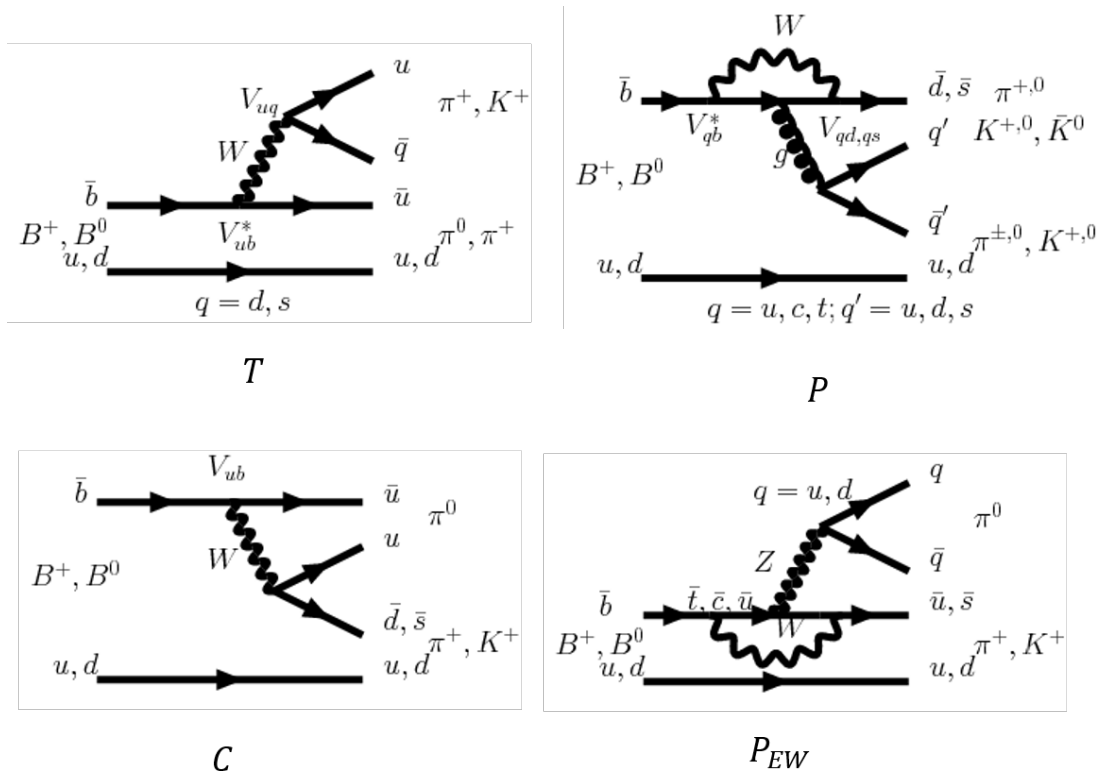


図 1.6  $B \rightarrow hh$  崩壊のダイアグラム [15] 8 種類のダイアグラムのうち、この T と P の 2 つが支配的に寄与する

エネルギー  $E_{beam}$  と再構成された B 中間子のエネルギー  $E_B$  の差、すなわち

$$\Delta E = E_B - E_{beam}, \quad (1.4)$$

である。よって、これらの崩壊分岐比を精密に測定することで、標準模型とのずれを観測することが期待できる。

以上のような  $B$  中間子の崩壊には終状態に  $K^\pm, \pi^\pm$  が多く含まれる場合が多く、 $K/\pi$  中間子を精密に識別はすることは Belle II 実験の目的である新物理の探索に重要な役割を果たす。

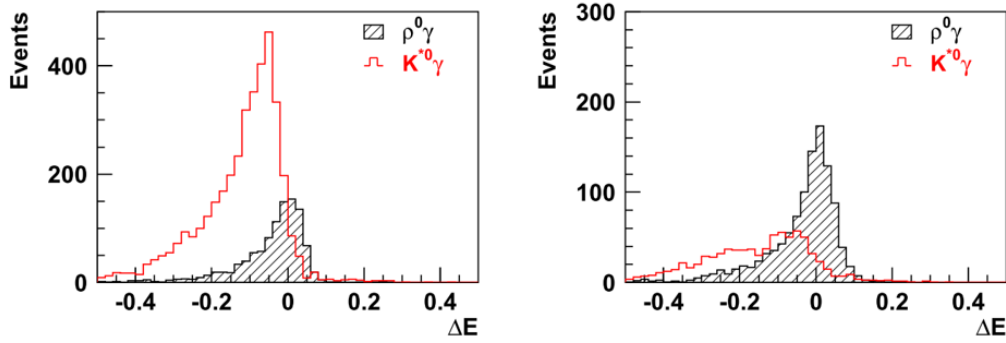


図 1.7  $7.5 \text{ ab}^{-1}$  での  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  の期待される  $\Delta E$  分布の比較 (左) Belle 実験での PID (右) Belle II 実験での PID [16] 左では  $K^{*0} \gamma$  に埋もれている  $\rho^0 \gamma$  の信号が右でははっきりと区別ができる

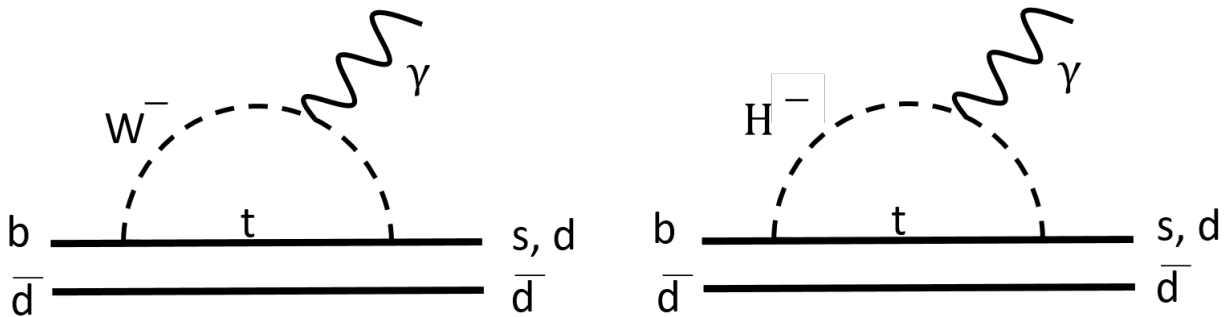


図 1.8 FCNC 過程のファイマンダイアグラムの一例  
左が標準模型過程であり右が新物理過程である. このように  $W$  に代わって  $H^\pm$  のような粒子の寄与が存在するならば, 崩壊分岐比等に標準模型とのずれが生じる.



## 第 2 章

# SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器

Belle II 実験は B 中間子崩壊の多統計、高精度測定による新物理の探索に向けて前身の Belle 実験の KEKB 加速器, Belle 検出器をそれぞれ Super KEKB 加速器, Belle II 測定器へと改良した. この章では Belle II 実験の構成要素について説明する,

### 2.1 SuperKEKB 加速器

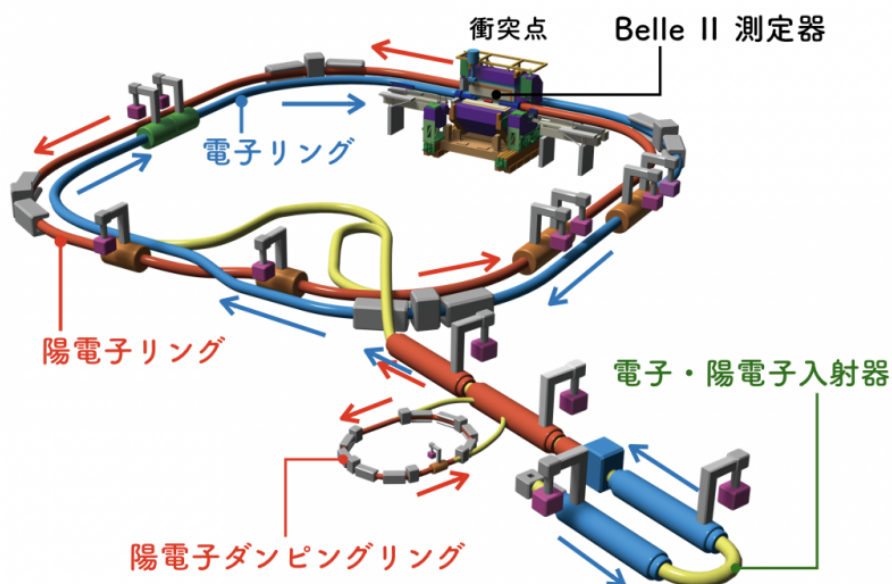


図 2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB(図 2.1) は電子-陽電子非対称エネルギー衝突型加速器である [17]. Belle 実験で使用していた KEKB 加速器をアップグレードしたもので, トンネルは同じものを使用している. 設計ルミノシティは KEKB が記録した  $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  の約 40 倍の  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  を目指している.

衝突点で 2 つのビームがフラットであり, 平行, 垂直の両方向のビームサイズが等しいと仮定した場合の加速器のルミノシティは以下の形で与えられる.

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left( \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right) \left( \frac{R_L}{R_{\xi_y}} \right). \quad (2.1)$$

ここで  $\gamma$ ,  $e$ ,  $r_e$  はローレンツ要素, 素電荷, 古典電子半径である.  $\pm$  記号は陽電子 (+) と電子 (-) を,  $*$  は衝突点を表す.  $R_L$ ,  $R_{\xi_y}$  は交差角と砂時計効果から生じる垂直方向ビームパラメータの減衰因子,  $I$  はビーム電流,  $\xi_y$  は垂直方向ビームパラメータ,  $\beta_y^*$  は衝突点垂直方向ベータ関数 (ビームサイズを決める関数のひとつ) を指す. 式 (2.1) によれば, ルミノシティは  $\beta_y^*$  を小さく,  $I, \xi_y$  を大きくする必要がある. しかしこれまでの衝突方式, 例えば正面衝突やクラブ衝突などでは砂時計効果やシンクロベータトロン共鳴によりルミノシティ増加にはつながらない [18]. そこで SuperKEKB ではナノビーム方式 (図 2.2) を採用した. これは水平方向に大きな交差角  $2\phi$  を持たせて重なり合う領域の長さ  $d$  をバンチ長  $\sigma_z$  よりも短くすることができ, バンチ長そのものは KEKB と同程度でも良いという利点がある. 長さ  $d$  は以下のように表せる.

$$d \sim \frac{\sigma_z^*}{\phi}. \quad (2.2)$$

これによりルミノシティの増加が期待できる. SuperKEKB 加速器では KEKB 加速器に対し, ビーム電流を 2 倍に,  $\beta_y^*$  は 1/20 倍にすることで 40 倍の性能を実現する. また,  $\beta_y^*$  を小さくする副作用としてタウシェック効果がある. これはビームサイズが小さくなるとクーロン散乱により (陽) 電子どうしでの衝突, 散乱が生じやすくなる効果であり, 特に陽電子に対して顕著である. よって SuperKEKB では陽電子ビームのエネルギーを 4.0 GeV へ増強し, また衝突エネルギーを  $\Upsilon(4S)$  にするため電子ビームのエネルギーを 7.0 GeV にした. KEKB の到達パラメータと SuperKEKB の設計パラメータを表 2.1 にまとめた.

## 2.2 Belle II 測定器

Belle II 測定器は 7 つの検出器からなる複合検出器である. Belle II 測定器は前身の Belle 実験で使用していた Belle 検出器をベースにしているが, 加速器の性能が 40 倍に増

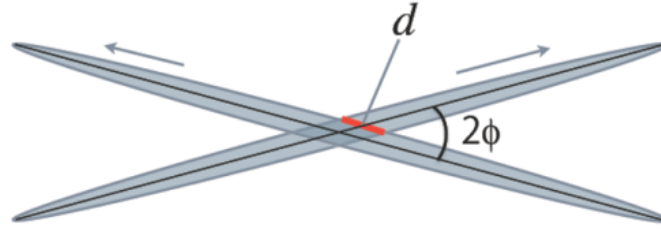


図 2.2 ナノビーム方式のビーム衝突

表 2.1 KEKB と SuperKEKB の基本パラメータ [16]

	KEKB	SuperKEKB
Energy(GeV) (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
$\xi_y$	0.129/0.090	0.090/0.088
$\beta_y^*$ (mm)	5.9/5.9	0.27/0.41
$I$ (A)	1.64/1.19	3.60/2.62
ルミノシティ ( $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	2.11	80

強されるのに伴い、40 倍のイベントレート、10-20 倍のバックグラウンドレートに対応しなくてはならない。よって各検出器には大規模な改良がなされた。Belle II 測定器の構成を図 2.3 に、Belle II 測定器を鉛直面で切った断面図を図 2.4 に示す。

Belle II 測定器において、ビーム軸の同心円上の領域を Barrel, 陽電子入射側の円筒底面を Forward-Endcap, 電子入射側を Backward-Endcap と呼ぶ。これは SuperKEKB が非対称エネルギー衝突型であるため、衝突後の重心系がローレンツブーストによって Forward-Endcap 側に偏ることからそう呼ばれる。そのためエンドキャップ部の粒子識別を行う ARICH 検出器は Forward 側にのみ設置されている。この節では Belle II 測定器を構成する検出器について概要を述べる。

### 2.2.1 VXD (PXD, SVD)

VXD (vertex detector) は 2 層の Pixel Detector (PXD) と 4 層の Silicon Vertex Detector (SVD) からなる Belle II 測定器において最も内側にある崩壊点検出器である。

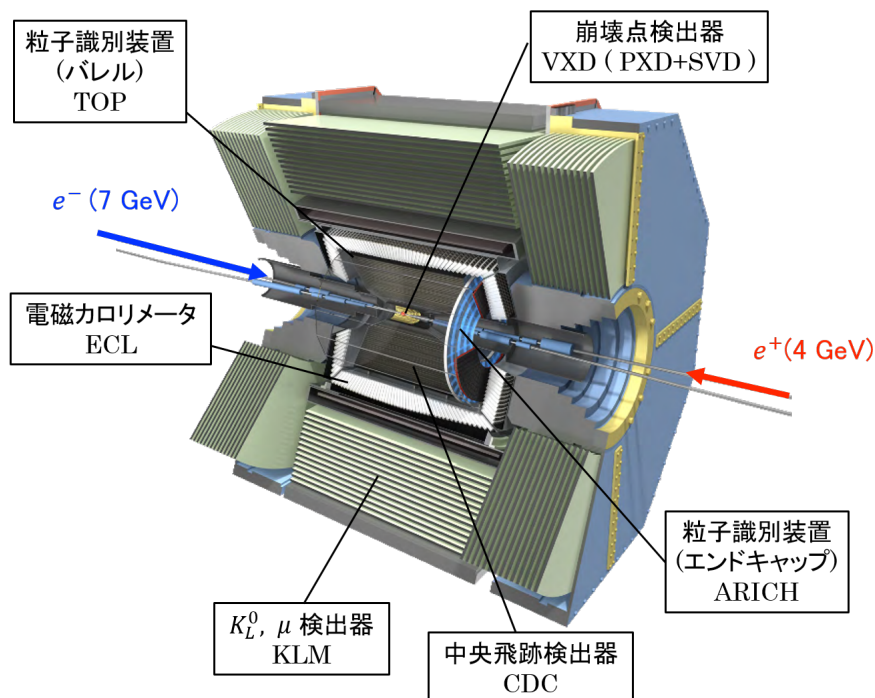


図 2.3 Belle II 測定器

VXD 検出器の構造は図 2.5 にあるように半径 10 mm のビームパイプを囲むように設置されている。VXD は  $B$  中間子の崩壊点の観測を行う。 $B$ ,  $\bar{B}$  の崩壊位置の差を測定することで時間依存 CP 非対称性を測定することができる。

PXD は DEPFET (DEpleted Field Effect Transistor) と呼ばれるピクセル半導体検出器で構成されている。半径 14 mm, 22 mm のところに設置されており、層の厚さは 75  $\mu\text{m}$  である。SVD は DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector) と呼ばれるセンサーによって構成されており、半径 38 mm, 80mm, 104mm, 135mm の距離に設置されており層の厚さは 320  $\mu\text{m}$  である。これらの検出器は多重散乱を防ぐために物質量が非常に小さく、最外層半径は Belle 実験の時 (88 mm) と比べるとは非常に大きくなっている。

## 2.2.2 CDC

中央飛跡検出器 CDC (Central Drift Chamber) は大体積のドリフトチェンバーであり、その役割は荷電粒子の運動量測定、トリガー信号の発信、崩壊点の位置決定など多岐にわたる。

ドリフトチェンバーとは、検出器内にガスを充満させ、その中に高電圧が印加されたワ

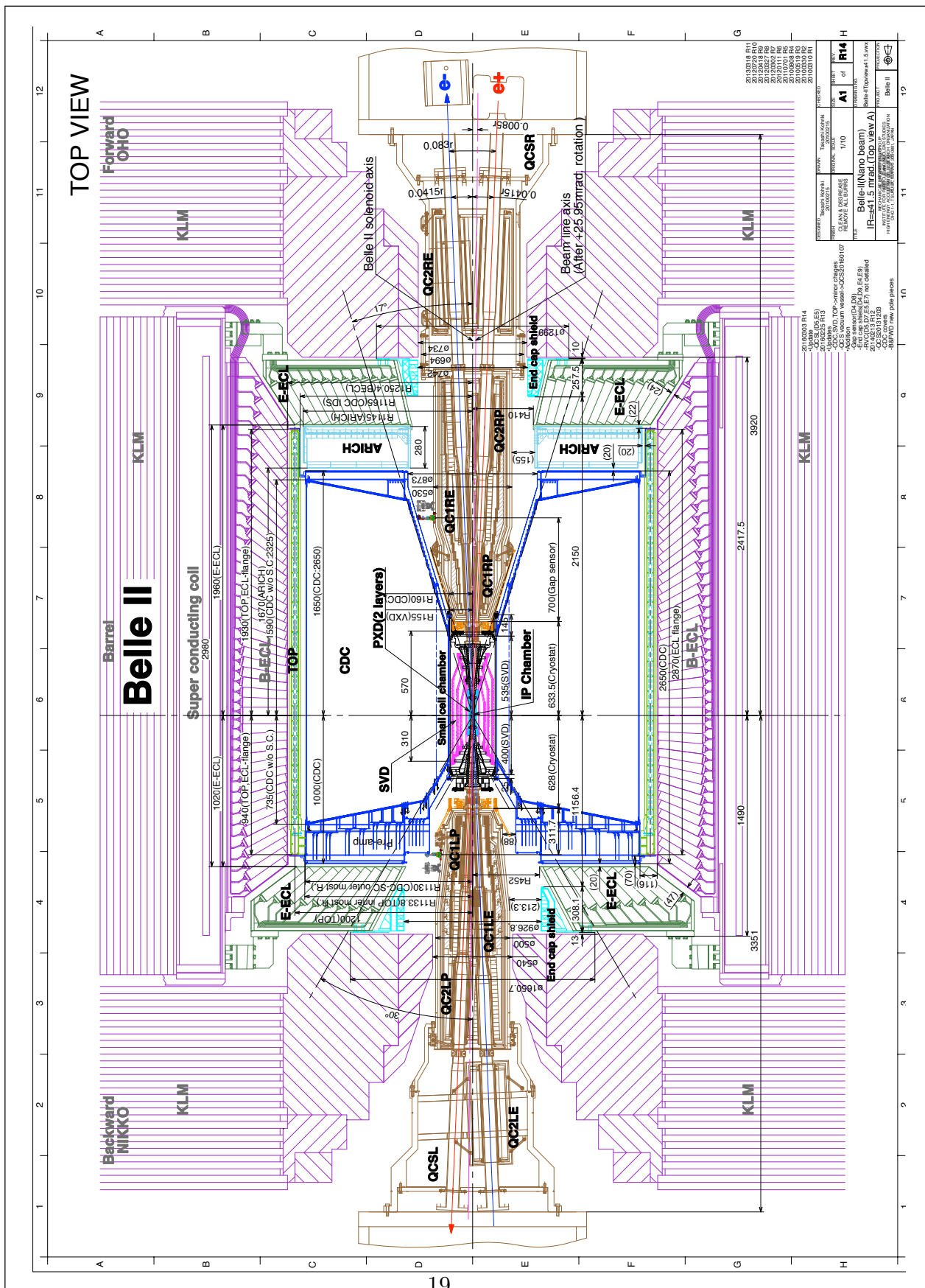


图 2.4 Belle II 測定器 配置図

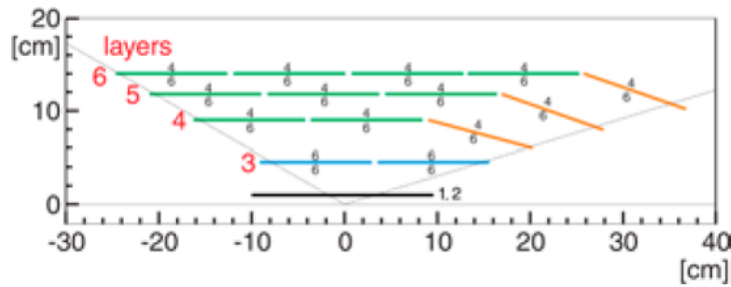


図 2.5 崩壊点検出器の層構造. 内側の 1, 2 層が PXD であり 3-6 層が SVD である.

ワイヤーを張ったものである. 検出原理を説明する. ワイヤーに高電圧を印加することでチェンバー内には電場勾配が生じる. 荷電粒子がチェンバー内を通るとガスが電離し自由電子とイオンに分かれる. その後自由電子は電場勾配に従い陽極ワイヤーに向かって移動し, さらに陽極付近で電子雪崩を起こす. イオンは陰極へと移動する. 電子がワイヤーに到達するとワイヤーに電荷が誘起され, 信号が生じるのでワイヤー付近に荷電粒子が通ったことがわかる.

Belle II 測定器内には 1.5 T の磁場がかけられており, 荷電粒子飛跡は曲線を描く. 曲線の曲率を見ることで運動量がわかり, またその変化量を見ることでエネルギー損失が計算できる. 運動量とエネルギー損失から質量がわかるため粒子識別が可能となる (図 2.6).

Belle 実験に比べて, バレル部分の粒子識別装置が薄くなったため外径を 880 mm から 1130 mm と大きくすることができた一方, 高いバックグラウンドを避けるため内径も 77 mm から 160 mm と大きくなった.

チェンバー内には He-C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> が 50:50 で充填されておりまた信号読み出し用のセンスワイヤーが 14336 本と電場形成用のフィールドワイヤーが 42240 本張られている. センスワイヤーは金メッキタングステンで直径 30 $\mu$ m であり電圧がかかっているが, フィールドワイヤーはアルミニウム合金で直径 126  $\mu$ m で電圧はグラウンドになっている. またセンスワイヤーはアクシャルワイヤーとステレオワイヤーの 2 種類あり, それぞれビームラインに対して平行, 斜めに張られている. これらの情報を組み合わせることより, 3D 再構成が可能になる.

設計上の位置分解能は 100  $\mu$ m, エネルギー損失  $dE/dx$  分解能は 5%, 運動量分解能  $\sigma_{p_t}$  は,

$$\sigma_{p_t} = p_t \sqrt{(0.2\% p_t)^2 + (0.3\% / \beta)^2}, \quad (2.3)$$

であり, 宇宙線測定から出された位置分解能は 120 $\mu$ m 以上, 運動量分解能は

$0.127P_t \oplus 0.321$  である [20].

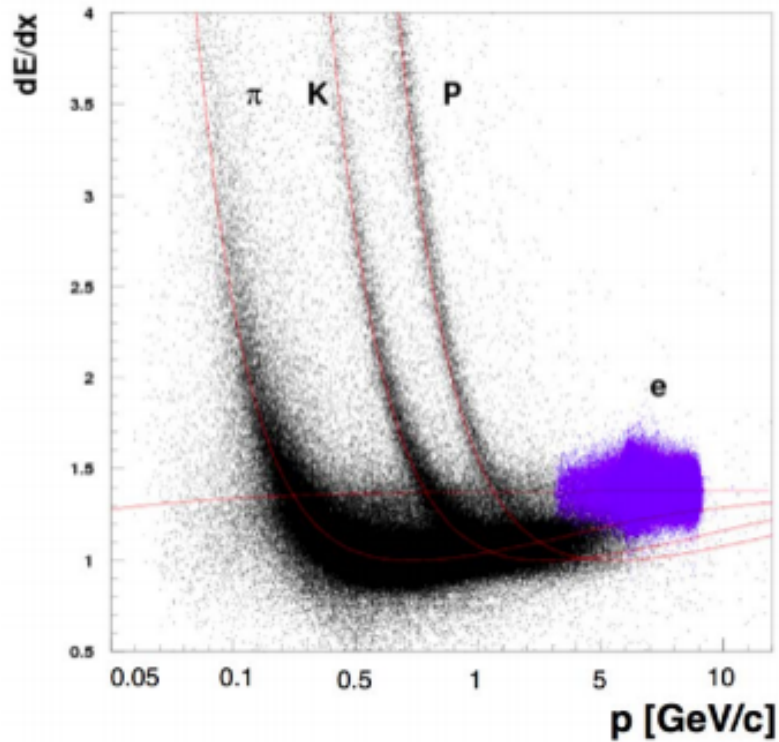


図 2.6 CDC 運動量とエネルギー損失の関係 1 GeV/c 以下の運動量領域で  $\pi, K, p, e$  が識別できる.

### 2.2.3 TOP

TOP(Time of propagation) はバレル部分の  $K^\pm$  と  $\pi^\pm$  の粒子識別を担っているチェレンコフカウンターである. Belle II 測定器では CDC と ECL の間の 12 cm のスペースに設置されており, 1.5 T の磁場中で運用される. TOP は輻射体である石英板と光検出器である MCP-PMT(Micro-Channel Plate photomultiplier tube), そして読み出し回路を取り付けたモジュール (図 2.8)16 個で構成されている. 荷電粒子が石英板を通る際にチェレンコフ光が発生する. そのうち全反射条件を満たすものは石英内で全反射を繰り返しながら伝播し, MCP-PMT にて観測がなされる. 粒子の質量, 運動量によって決まるチェレンコフ角によって経路が決まるため, 伝播時間と検出位置によってチェレンコフ角を測定

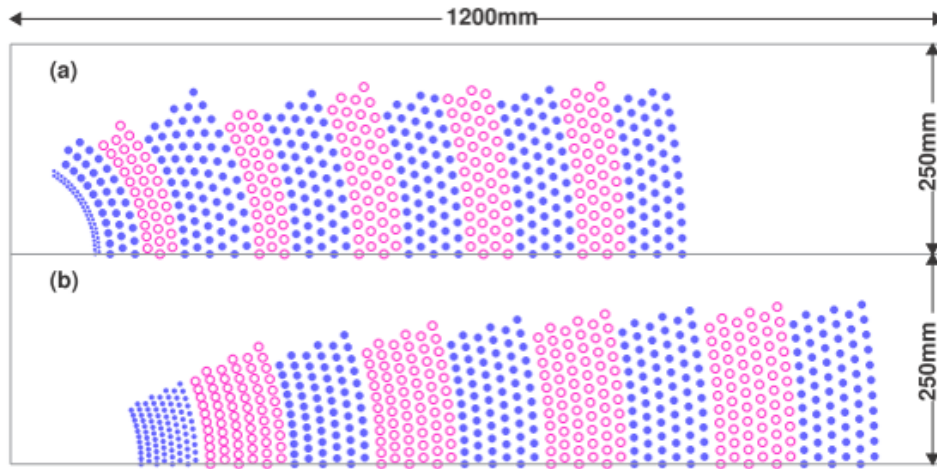


図 2.7 CDC のワイヤーの配置. (a) Belle CDC (b) Belle II CDC 青がアクシャルワイヤー, 赤がステレオワイヤーを表している.

する. TOP カウンターは検出位置を精密に測定し, 衝突点からの飛行時間情報を合わせることで荷電粒子の同定を行う. 運動量  $3 \text{ GeV}/c$  以下において 97 % の荷電  $K/\pi$  識別を目標としている.

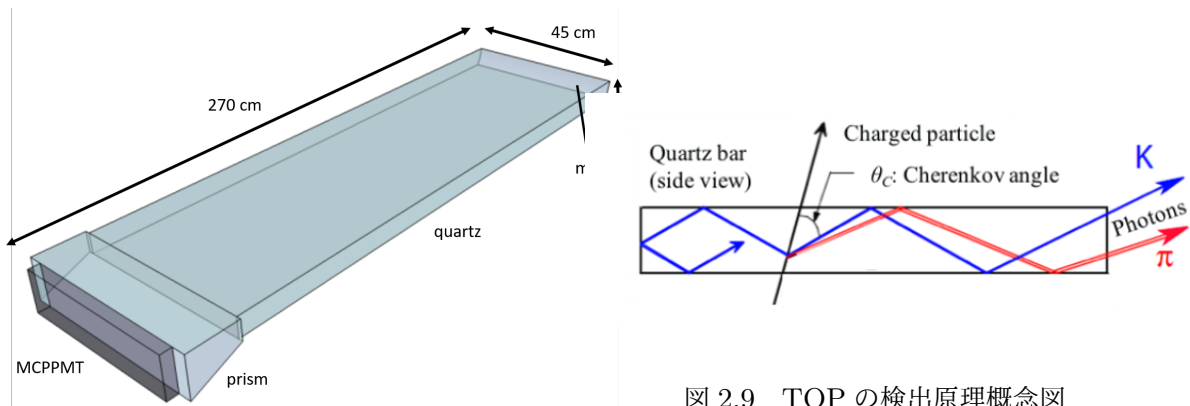


図 2.8 TOP モジュール

## 2.2.4 ARICH

ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov) はエンドキャップ部分の  $K^\pm$  と  $\pi^\pm$  の粒子識別を担っているチェレンコフカウンターである. 輻射体シリカエアロゲルと光検出器



HAPD から構成されている。

ARICH 検出器に関しては詳細を第 3 章に記す。

## 2.2.5 ECL

ECL はバレル部分とエンドキャップ部分において  $\gamma$ ,  $e^\pm$  のエネルギーを測定する電磁カロリメータ (Electromagnetic Calorimeter) である。シンチレータとして CsI(Tl) 結晶が使用されており、その数は 8736 個で重心系全立体角の 90 パーセント程度をカバーする。CsI (Tl) 結晶やプリアンプ、構造体は Belle 実験のときのものを再利用しているが、ビームバックグラウンドをファームウェアでの波形解析によって取り除くようにアップデートされている。ECL の光子エネルギー分解能と時間分解能を図 2.10 に示す。またエネルギー分解能は設計上は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{0.2\%}{E} \oplus \frac{1.6\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.2\%, \quad (2.4)$$

である。

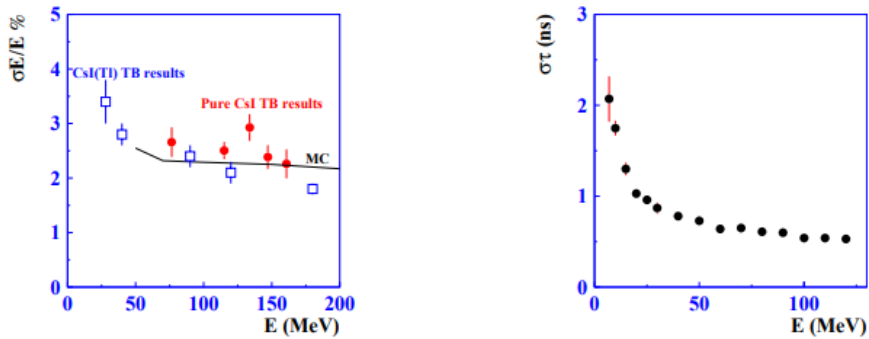


図 2.10 ビームテストでの ECL の光子でのエネルギー分解能 (左) と時間分解能 (右)

検出原理としては ECL に入射する  $\gamma$ ,  $e^\pm$  がシンチレータ内で電磁シャワーを起こしほぼすべてのエネルギーをシンチレーション光に変換する。この時の光量は入射粒子のエネルギーに比例するため、粒子のエネルギーを測定できる。これらの情報はトリガーに使用されたり、また Barbar 散乱の頻度を測定することでルミノシティの見積もりも行っている。ルミノシティの見積もりは誤差 1.87% 程度に収まっている。

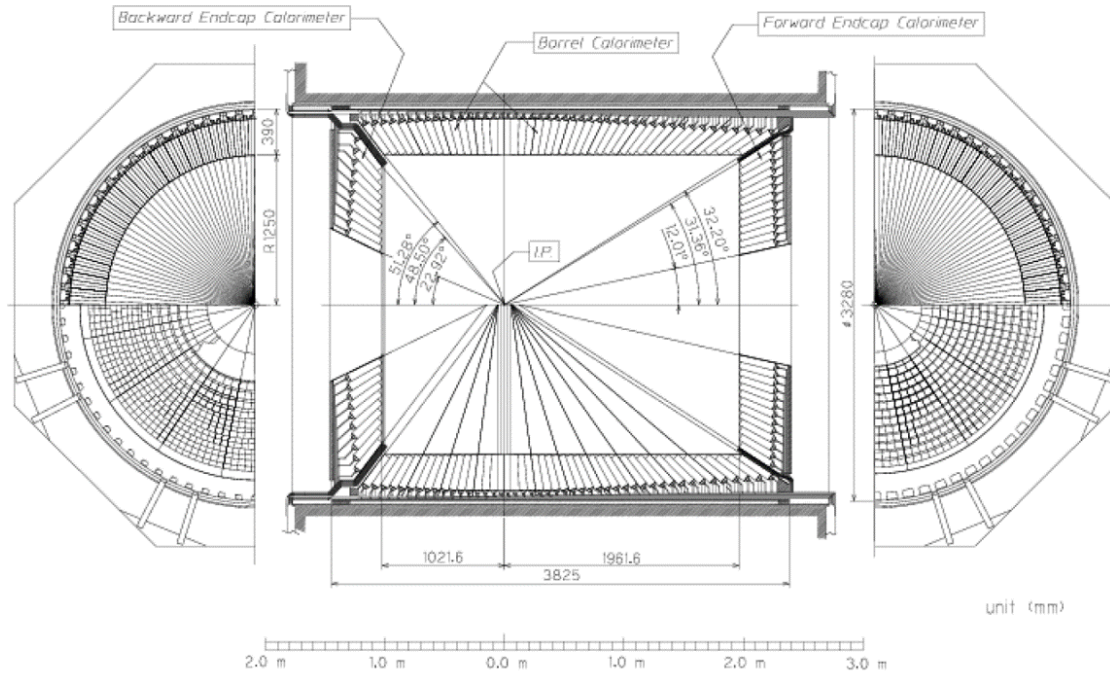


図 2.11 ECL の断面図

## 2.2.6 KLM

KLM( $K_L^0, \mu$ ) 検出器は超伝導ソレノイドの外側に位置しており、磁場が外に漏れないようにしていると同時に長寿命粒子である  $K_L^0, \mu$  の検出を行う。特に  $\mu$  粒子は質量が軽いことから、内層の検出器ではその運動量、エネルギーを測定できないため、KLM でその測定を行う。KLM は厚さが 4.7 cm の鉄の板と検出器とのサンドイッチ構造になっており、荷電粒子の通過を検出できるようになっている。粒子が KLM に入射した際  $\mu$  は物質中での電離損失が生じるだけだが、荷電ハドロンは強い相互作用によって多重反応が生じる。その違いを利用することで  $K_L^0, \mu$  の同定を行う。

検出器には RPC(Resistive Plate Chamber) というガスチェンバーが採用されており、大面積でも比較的安価で作成が可能であるが、荷電粒子の通過による放電が発生すると 2 秒程度の間不感時間が生じる。そのため高いバックグラウンド環境下ではそれによる不感時間が長くなり、検出効率が悪くなる。そのため、エンドキャップ部分全てとバレル部分の内側 2 層には WLS(WaveLength Shifting) ファイバーが差し込まれたプラスチックシン

チレータが採用された。

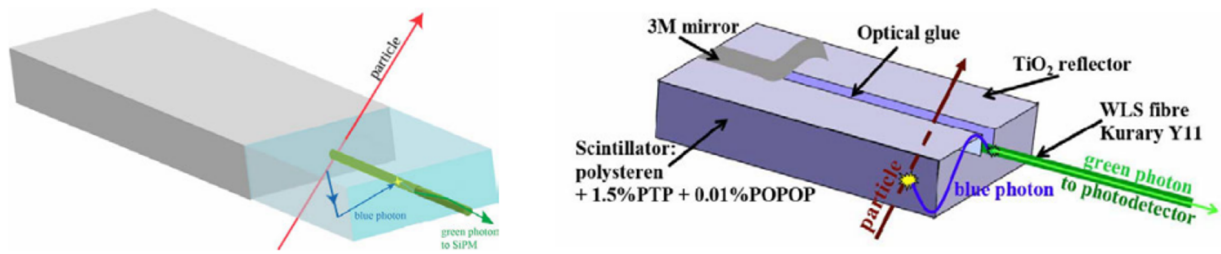


図 2.12 KLM で採用されたプラスチックシンチレータを使用した検出器 (左) バレル部分 (右) エンドキャップ部分

## 2.2.7 データ収集システム:DAQ

Belle II 実験では高ルミノシティや検出器の高精細化によって検出器からのデータ量はイベント当たり 1MB 以上になり、レベル 1 トリガーレートは 30 kHz になると考えられる。データ収集システム (DAQ: data acquisition) には 30GB/s という膨大なデータの処理が要求される。データのリアルタイム処理による削減や不感時間の最小化が求められる。

Belle II 実験におけるデータ収集システムの概要図を図 2.13 に示す。

各検出器の信号は FEE (Front End Electronics) によってデジタル信号に変換され、Belle2Link ネットワークにより COPPER (Common Pipelined Platform for Electronics Readout) ボードと ROPC (Readout PC) によって集められたのちイベント構築がなされ、その後 10 GdE ネットワークにより HLT(High level trigger) に送られる。HLT ではイベント再構成が行われ物理イベントの選択がなされる。ただし PXD に関してはデータ量が膨大なので、FPGA ファームウェアによるデジタル信号処理によってデータ量の削減を行う ONSEN (Online select node) システムを開発し、これによって HLT によって再構成された粒子の飛跡から予測されるピクセルの信号のみを使用することでデータ量を 1/10 以下に削減する。その後全ての検出器からのデータは統合され、第 2 イベント構築の後ストレージに保存される。

FEE は検出器内に設置されているが、COPPER ボードや ROPC は E-hut と呼ばれる建屋に設置されている。E-hut は Belle II 測定器のある筑波実験棟の地下 4 階、Belle II 測定器のすぐ隣に設置されている 2 階建ての建屋であり、読み出し用のクレートや PC だけでなく電源供給クレートや冷却用チラーなどが設置されている。これらをつなぐケーブル類の長さは 30 m 程度である。

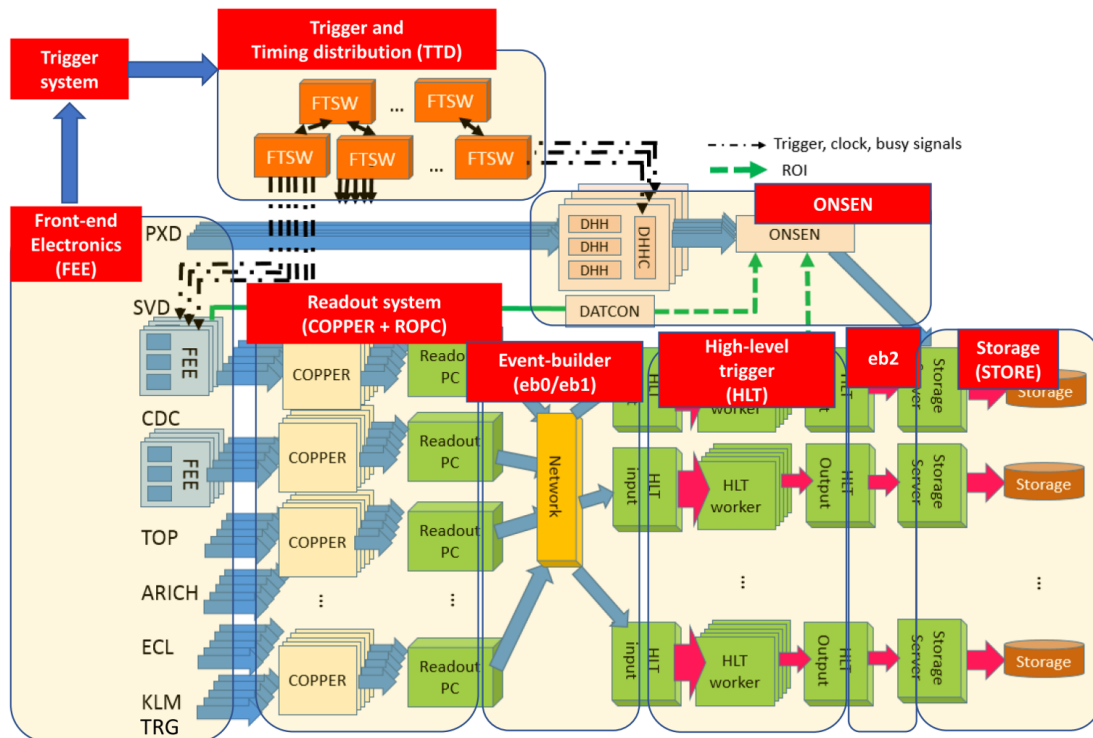


図 2.13 DAQ の概要図

### Slow control

Belle II 実験では検出器を構成する多数のサブシステムを包括的に制御し、HV 印加やデータ収集の操作や各種モニター値の取得などを行う Slow control ソフトウェアシステムを構築している (図 2.14). サブシステム間では NSM2 (Network Shared Memory) と EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) の 2 種類の通信プロトコルを介して通信を行い、各種モニター情報は PV (Process Variable) と呼ばれる共通規格の監視データとしてネットワーク越しにやり取りを行う. NSM と EPICS の間での通信形式の変換では ca2nsm, nsm2ca というソフトウェアを開発し両者のプロトコル間の橋渡しを行っている (2.15). また、NSM2 や EPICS をベースとして各検出器毎に制御ソフトウェアを開発し、Belle II 全体とは別に検出器ごとに個別の制御システムを構築している.

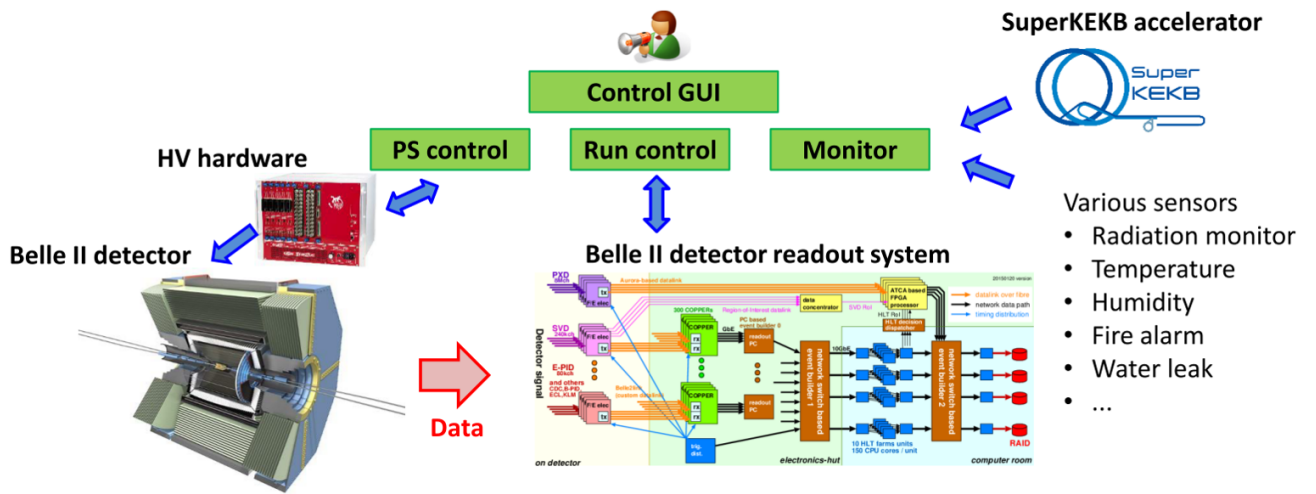


図 2.14 Slow control system の概要図

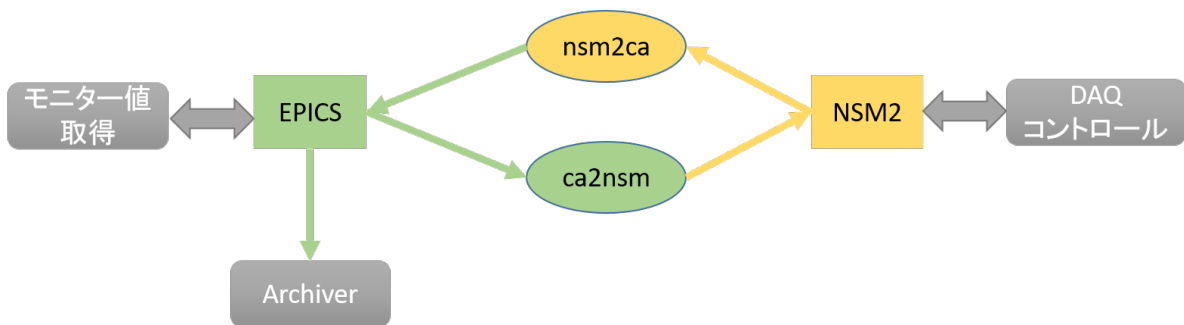


図 2.15 slow control network

## 2.2.8 運用体制

Belle II 測定器は様々な検出器によって構築されているが、その管理は Belle II DAQ システム全体で一括して行う。そこでデータ収集を行うのが CR(Control Room) シフトである。CR シフトは 24 時間 3 交代制であり 2 人体制で行われる。つまり 1 日 6 人のシフターが存在し、常に各検出器の DAQ, HV の操作や測定データの監視を行い、必要に応じて各部門の担当者であるエキスパートシフトに連絡する。また Belle II 検出器と Super KEKB 加速器との連絡を行う BCG シフトや放射線管理区域等への管理を行う安全シフトなども存在する。

## 2.3 BelleII 実験の現状及び見通し

Belle II 実験の計画は3段階(表 2.2)に分かれており、現在は3段階目である Phase III に入った。Phase I では Belle II 測定器と最終収束磁石(QCS)をインストールせず、小型検出器 BEAST II (Beam Exorcism for A Stable Belle II Experiment)を使用したバックグラウンドや動作環境の確認を行った。Phase II では VXD を除く全ての検出器を使用し、ビーム衝突をさせて物理データとキャリブレーション用のデータを取得した。Phase II 前半では主に加速器や測定器の試運転、バックグラウンドの調査、KEKB 加速器の瞬間ルミノシティ  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  への到達が行われ、後半に物理データの取得を行った。なお、導入されていない VXD 部分の影響は BEAST II がほぼ同量の物質質量になるようになっているためバックグラウンド調査には物理測定に対して影響がなかったが、VXD 検出器を用いた時間依存 CP 非対称測定は行わなかった。それでも、多くの崩壊モードを測定し、Belle II 測定器の状態を確認できた。Phase III では全検出器をインストールして、物理データの取得を行っている。Belle II 実験のルミノシティの見通しを図 2.16 に示す。

2019 年には実験を行わないシャットダウン期間が夏と冬の2回設けられており、実験期間は春と秋の2つの期間に行われた。以降においては春の実験期間を 2019a、秋の実験期間を 2019c と呼称する。シャットダウン期間には運転中は放射線管理区域になっているために運転中は立ち入ることのできない Belle II 測定器や SuperKEKB 加速器内のメンテナンスを行う。2019 年の期間についての詳しい情報は表 2.3 にまとめた。

表 2.2 Belle II 実験 計画

段階	内容	期間
Phase I	BEAST II によるビーム BG の研究 Belle II 測定器, QCS は無し ビーム衝突無し (周回のみ) ビームパイプの真空焼きだし	2016 年 2 月 ~ 2016 年 6 月
Phase II	加速器の試運転期間 検出器の試運転期間 BG 研究	2018 年 2 月 ~ 2018 年 7 月
Phase III	本格的な物理データ取得 ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指す.	2019 年 2 月 ~

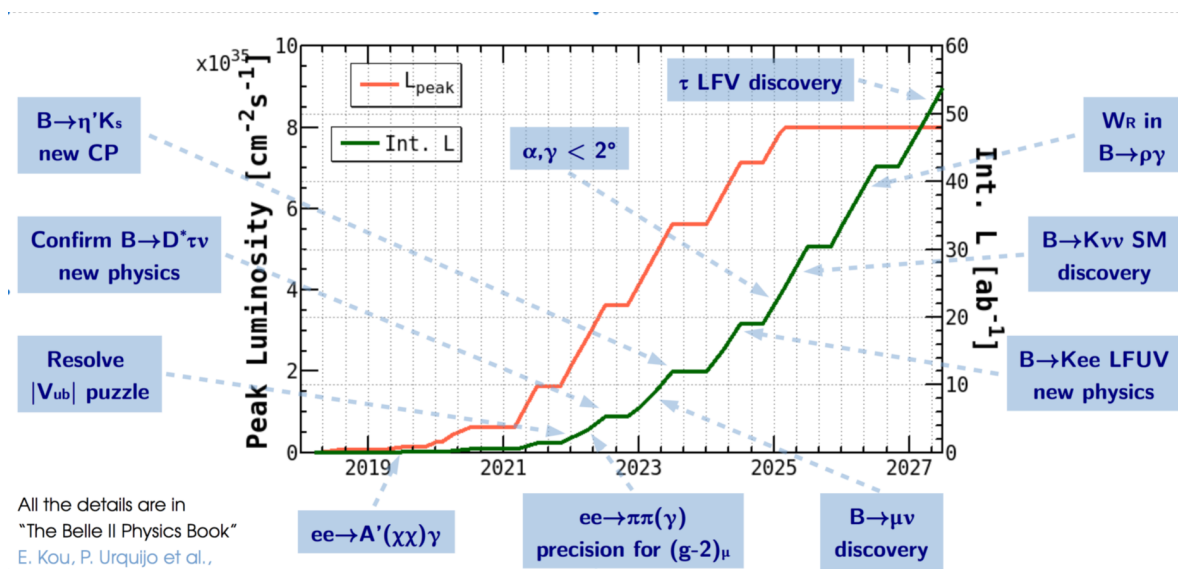


図 2.16 Belle II 実験のルミノシティの見通しと期待される物理モード.[19].

表 2.3 2019 年 年表

期間	内容	備考
~3月10日	シャットダウン期間	Phase II での問題点の改修
3月11日~7月1日	実験期間 (2019a)	3月25日から物理データ取得開始
7月2日~9月15日	シャットダウン期間	
9月16日~12月13日	実験期間 (2019c)	
12月14日~2020年2月16日	シャットダウン期間	



## 第 3 章

# ARICH 検出器

ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov counter) は Belle II 測定器のエンドキャップ部分において  $1.5 \text{ GeV}/c \sim 3.5 \text{ GeV}/c$  といった高運動領域での  $K^\pm, \pi^\pm$  の粒子識別を  $4\sigma$  の精度で行う検出器である。Belle 実験の時は ARICH ではなく閾値型 ACC (Aerogel Cherenkov Counter) がエンドキャップ部分の粒子識別を行っていたが、新物理の探索のために ACC では難しい高運動量領域での粒子識別が求められた。また空間的制約としてビームライン上  $280 \text{ mm}$  の幅にしか検出器を設置できないという点も問題であった。以上の問題の解決のために ARICH 検出器が開発された。この章では ARICH 検出器について説明する。

### 3.1 ARICH の粒子識別原理

荷電粒子が輻射体であるエアロゲルを通過する際チェレンコフ光が発生する。チェレンコフ光は粒子の運動量  $p$  と質量  $m$  によって放射角が決定される。 $n$  を輻射体の屈折率と置くと、放射角を  $\theta_c$  は以下のように書くことができる。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{p^2 + m^2}}{p}. \quad (3.1)$$

チェレンコフ光は輻射体の後ろにある光検出器にリングイメージとして検出される。放射角の違いはリングイメージ上ではリングの半径の違いとして現れる。チェレンコフ光発生点と光検出器までの距離を  $L$ 、リング半径を  $r$  と置くとチェレンコフ角  $\theta_c$  は以下の式で計算することができる。

$$\theta_c = \arctan \frac{r}{L}. \quad (3.2)$$

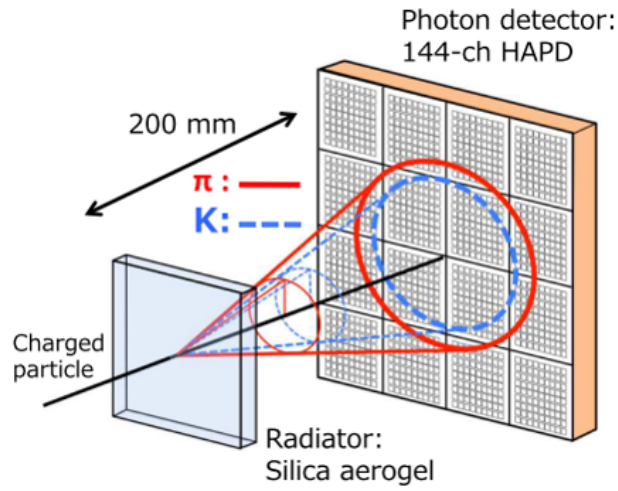


図 3.1 ARICH 検出原理 イメージ図

$p = 3.5 \text{ GeV}/c$ ,  $n = 1.05$  において  $K$  と  $\pi$  のリング半径はそれぞれ 48 mm, 54 mm になり, その差は 6 mm になる.  $p = 4 \text{ GeV}/c$  ではリング半径差は 5 mm である. そのため光検出器には 5 mm 程度以下の分解能が要求される.

(図 3.2)

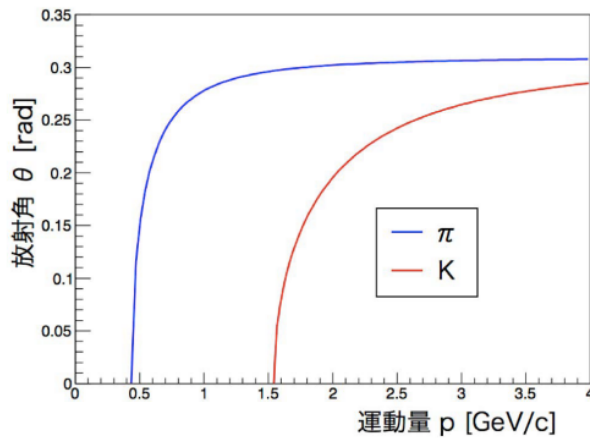


図 3.2 ARICH における  $K/\pi$  の運動量に対するチェレンコフ角

## 3.2 ARICH の構成

ARICH は主に輻射体, 光検出器, 読み出し回路によって構成される. また, ARICH 外層壁に到達したチェレンコフ光を観測するために, HAPD 層の外周には反射ミラーが設置されている. 形状は外径 1.1 m, 内径 0.4 m のドーナツ型である. また読み出し回路は光検出器に直接接続されている. 図 3.3 は輻射体と HAPD+ 読み出し回路をドッキングした際の写真である. 左の青い円盤が輻射体, 右の円盤が HAPD と読み出し回路層であり, 右の円盤に厚みがあるように見える部分がミラーである. 衝突点側から厚さ 4 cm の輻射体, 16 cm の空間をおいて厚さ 3 cm の光検出器が配置される. 光検出器の後ろには読み出し回路用の空間が 5 cm 用意されている. ARICH の構造を図 3.4 に, ビーム軸に対する断面から見た配置を図 3.5 に示す.

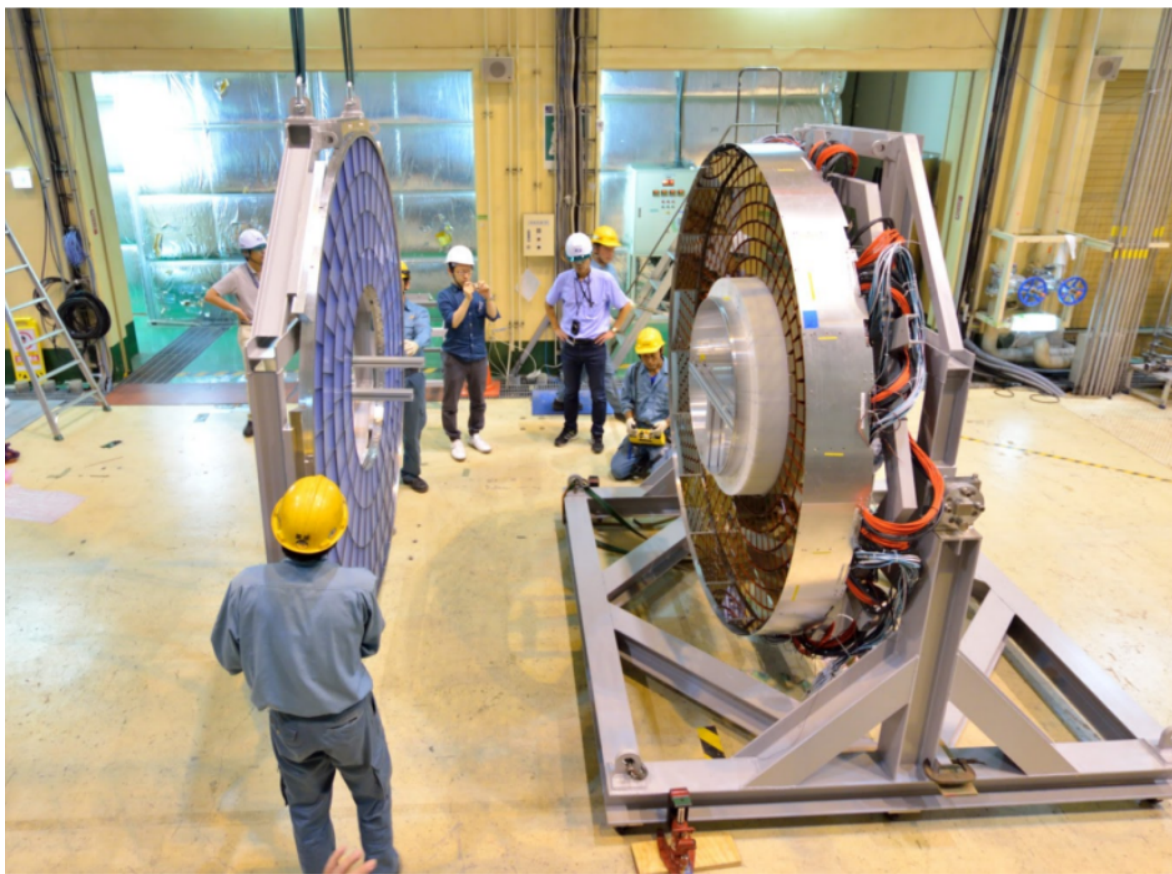


図 3.3 HAPD 層とエアロゲル層の構造体ドッキングの様子

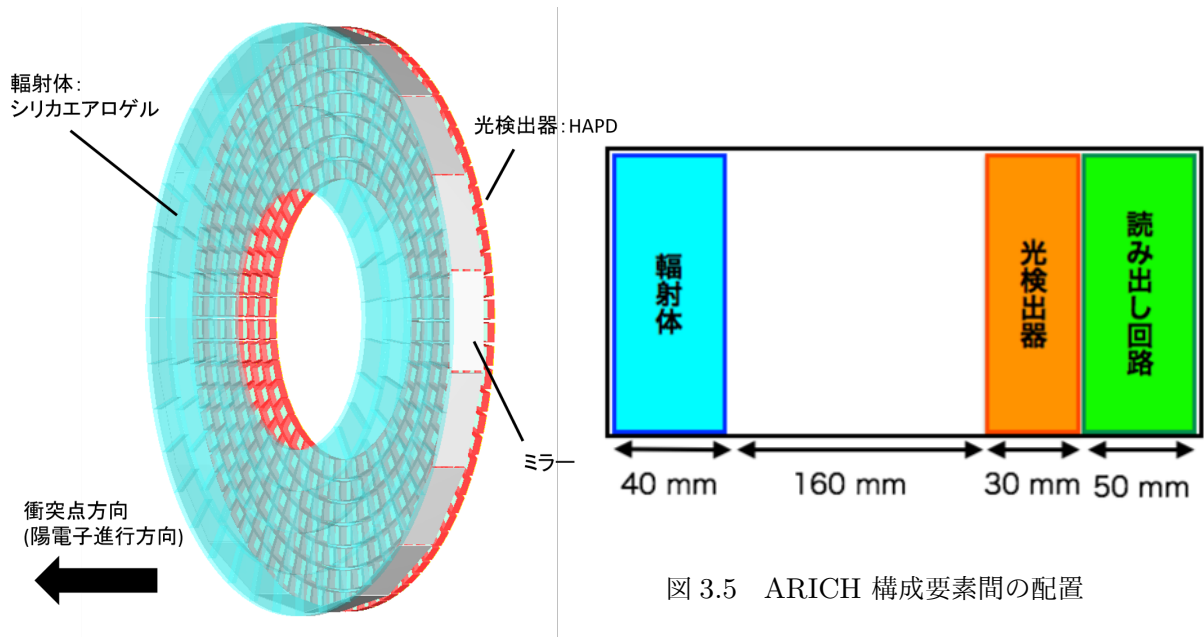


図 3.4 ARICH 構造図

図 3.5 ARICH 構成要素間の配置

### 3.2.1 輻射体：シリカエアロゲル

輻射体にはシリカエアロゲル [21] が使用されている。シリカエアロゲルは  $\text{SiO}_2$  が主成分である多孔質の固体である。(図 3.6) ARICH で使用するエアロゲルは固体でありながらも、体積の 98% が空気である低密度、屈折率は 1.007~1.2 の範囲で調整できるため低屈折率が実現可能、60 mm 程の高い透過長をもつという特殊な構造をしている。チェレンコフ角の測定精度の向上には、光量をより多くすればよい。そのためには輻射体は厚く、屈折率を大きくする必要がある。しかしそれを行うと  $K^\pm, \pi^\pm$  の角度差の減少や式 (3.2) での  $L$  の不定性を大きくしてしまうという欠点が生じる。ARICH 検出器では厚さ 2 cm の屈折率  $n_1 = 1.045$  と  $n_2 = 1.055$  の 2 枚のシリカエアロゲルを使用し、デュアルレイヤー方式 (図 3.7) を採用した。屈折率の異なる 2 層のシリカエアロゲルを使用するデュアルレイヤー方式により同じ厚さの単一層だけの場合よりも cherenkov 光の広がりを小さくすることができる。ARICH 検出器では大きさ  $18 \times 18 \times 2\text{cm}^3$  のタイルを 248 枚 (1 層当たり 124 枚) 使用する。

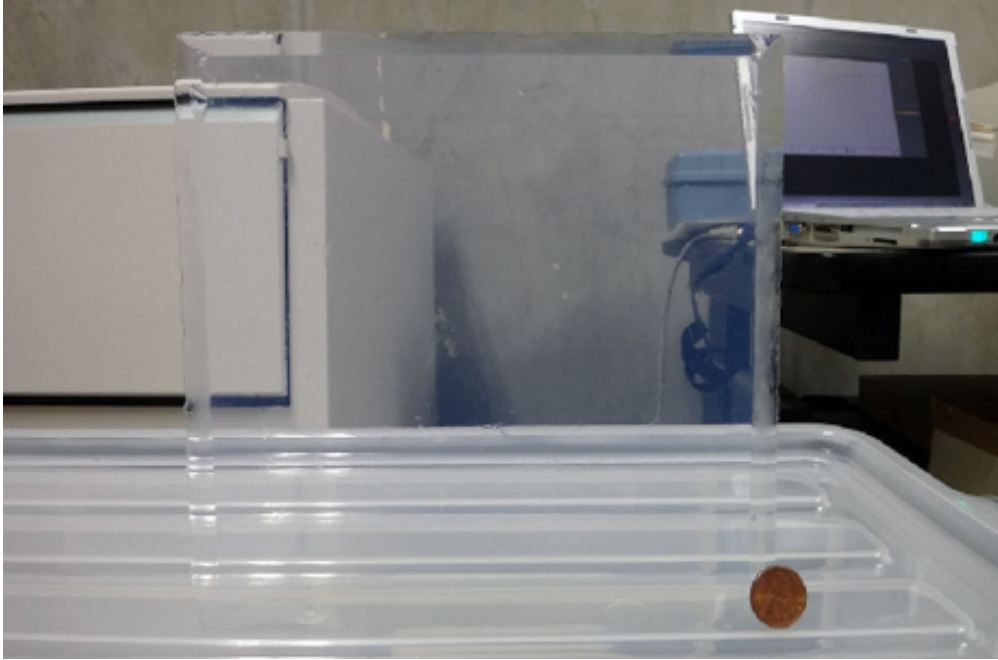


図 3.6 エアロゲルの写真 レイリー散乱によって若干青く見える

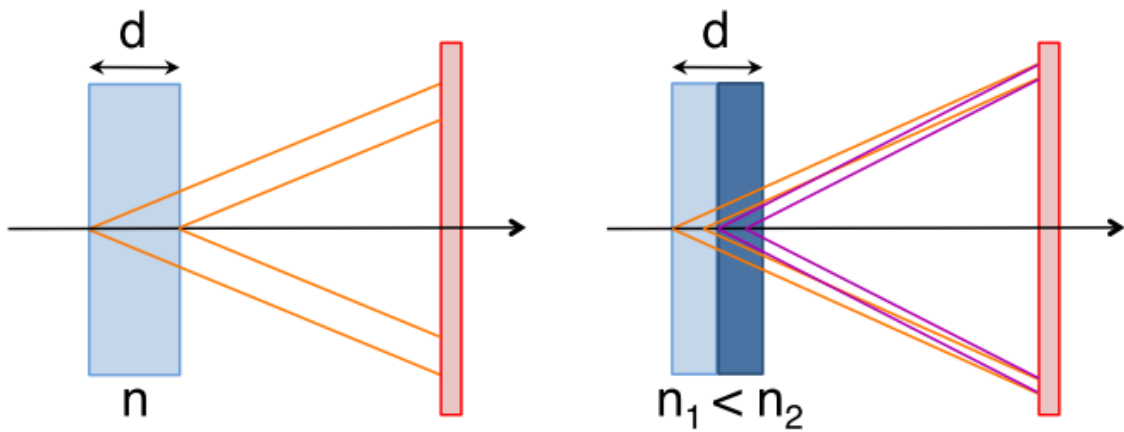


図 3.7 デュアルレイヤー方式の概要図 (左) 単一層のみ (右) デュアルレイヤー方式  
右のほうが輻射体の両端から出たチェレンコフ光の半径差が小さくなる

### 3.2.2 光検出器 : HAPD

ARICH 検出器において, 光検出器に求められる要求性能は以下である. これらの要求を満たす光検出器として ARICH 検出器では HAPD (Hybrid Avalanche Photo-Detector)[22] を浜松ホトニクスと共同開発した.

- コンパクトであること.

ARICH は CDC と ECL の間に挟まれており, これらの検出器のサイズをできるだけ大きくするために ARICH のスペースは小さくしなければならない. よって光検出器もコンパクトであることが望ましい.

- ピクセルはおよそ  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  程度である.

図 3.2 から 3.5 GeV でリング半径差は 6 mm であることがわかる. これは標準模型とのずれに感度がある崩壊モードの識別ができるようになるエネルギーであり, ピクセルサイズもその識別ができる程度でなければならない. (§??)

- 単光子検出がよい精度でできること.

ARICH はチェレンコフ光の検出をすることでリングイメージを構成が必要であるため, 信号とノイズの分離が重要である. HAPD では青色 LED を使用した波高分布 (図 3.10) から, 1 光子の増幅率が 46,000 でありノイズのそれは 2,000 程度と計算できることから  $S/N \sim 23$  を得た. なお量子効率 は波長 400 nm において約 20% である.

- 1.5 T の強磁場中で動作可能であること.

Belle II 検出器では粒子の運動量測定のためにソレノイドコイルを使用した磁場を形成しており, ARICH 検出器はそのソレノイドコイル内で動作することを求められる.

- 高い放射線耐性を持つこと.

実験中の HAPD の交換は非常に困難であるため, 光検出器には放射線耐性が要求される. Belle II 実験では 10 年間でのトータルでおよそ 100 Gy もの  $\gamma$  線量, 1 年間で  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , つまり 1 MeV の中性子フルエンスが想定される.

HAPD は真空管内にピクセル化された APD(Avalanche Photo Diode) が 4 つ内蔵された光検出器であり, 読み出しチャンネルが 144 チャンネル, 大きさが 73 mm $\times$ 73 mm, ピクセルサイズが 4.9 mm $\times$ 4.9 mm となっている. HAPD の写真を図 3.9 に示す.

HAPD の動作原理を説明する. (図 3.8) 輻射体でチェレンコフ光が発生した後, その光

子は光電面で光電子に変換される。光電面と APD の間には加速用電圧 ( $\sim 7000\text{V}$ ) が印加されており, 光電子は加速され APD に衝突し 1500 程度の電子正孔対を生成する。増幅された電子は APD に印加されている逆バイアス電圧 ( $\sim 350\text{V}$ ) により雪崩増幅が生じることで 40 倍程度に増幅され, 最終的に  $6 \times 10^4$  倍という増幅率を得ることができる。また, APD への衝突と雪崩増幅の 2 段階増幅が Hybrid と呼ばれる所以である。

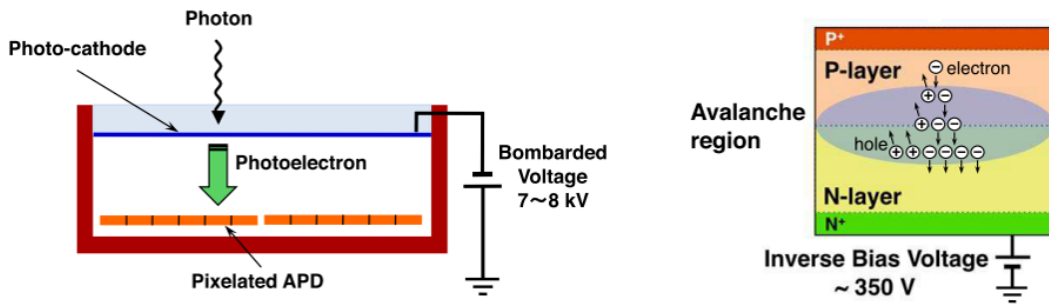


図 3.8 (左) HAPD の内部構造 (右) APD の内部構造

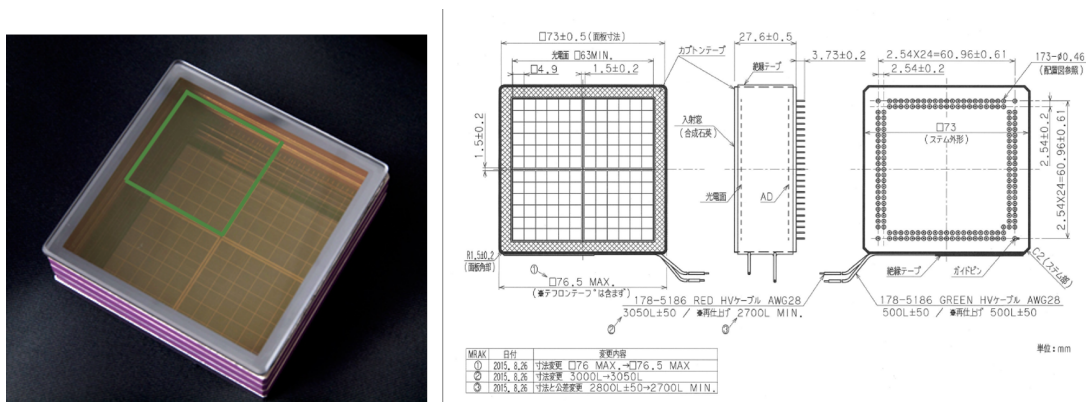


図 3.9 (左) HAPD 写真 緑の線は 1APD を示す。 (右)HAPD 設計図

ARICH では HAPD の管理のために様々な番号付けを行っている。(図 3.12) 以降では各 HAPD の番号をモジュール番号と呼び, また HAPD 層を動径方向に 6 分割したものをセクターと呼ぶ。

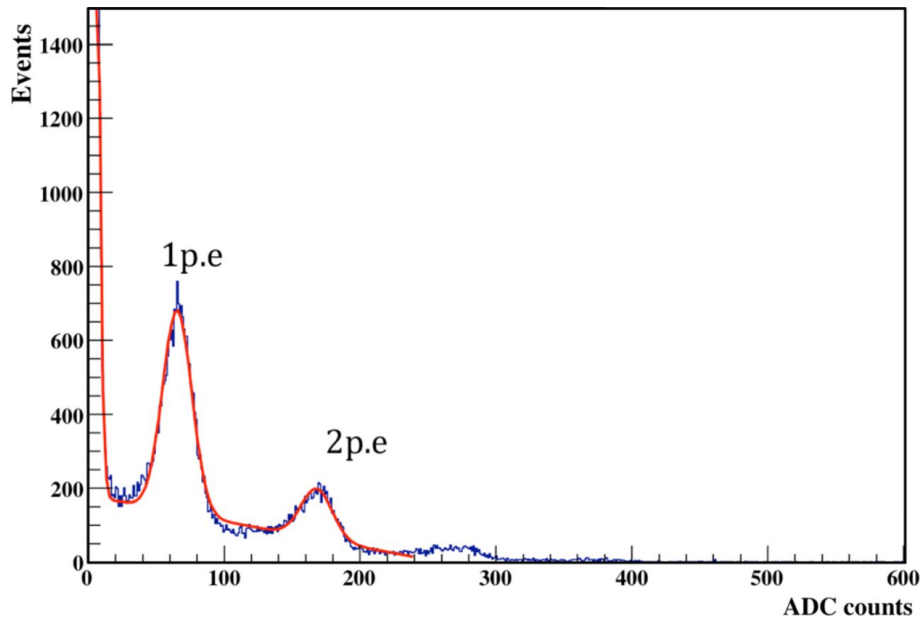


図 3.10 青色 LED で HAPD にパルス光を当てた時の波高分布

### 3.2.3 読み出しシステム

ARICH の読み出しシステムは主に FEB (Front End Board)[24] と MB (Merger Board), COPPER ボード, ROPC からなる. FEB は HAPD に直接接続されている回路で, HAPD からのヒットの有無の区別する役割を持ち, ARICH 専用の ASIC が APD ごとに, つまり FEB1 機に 4 つ搭載されている. MB は 5, 6 機の FEB からのビットデータを 1 つに統合する役割をもち, 72 機使用している. FEB に積載されている ASIC は ARICH 用にカスタムされたものであり, 入力信号の増幅, 整形, デジタル化 (HAPD から入力されたアナログ信号を比較器を用いて閾値の超過から光電子検出の有無を判定する) を行う. 2 つの ESD (ElectroStatic Discharge) 保護ダイオードによって過電流からの保護がなされている. ASIC の動作は内部レジスタによって制御されており, 制御デジタル信号は FPGA に接続される. FPGA は ASIC の制御および ASIC 出力のサンプリング, トリガー信号の受信, MB への送信を行うことができる. MB の FPGA には Vertex-5, FEB の FPGA には Spartan-6 を使用している.

5 機ないしは 6 機の FEB から MB に送られた信号は Belle2Link と呼ばれる通信規格を介して COPPER ボード内にある HSLB(High Speed Link Board) へ送られる. また Belle2link を介して FEB, MB の内部レジスタの情報の取得も可能であり, 供給電圧, 温



度, アナログ信号やデジタル信号等をモニターすることができる. これらの情報は Slow control (§3.2.6) によって統括, ユーザーによって管理される.

ARICH では HAPD を 420 台使用しているので, FEB も 420 機である. COPPER ボードは 4 つの MB のデータを 1 つに統合しており 18 基, ROPC は 6 台使用している. また MB にはそれぞれにシリアル番号が付与されており, その番号によって MB の識別を行っている. MB のシリアル番号と位置については図 3.13 に示す.

表 3.1 LV 設定電圧一覧

電圧 [V]	
1.5	MB 用
3.8	MB, FEB 用
2.0	FEB 用 (ASIC 用)
-2.0	FEB 用 (ASIC 用)

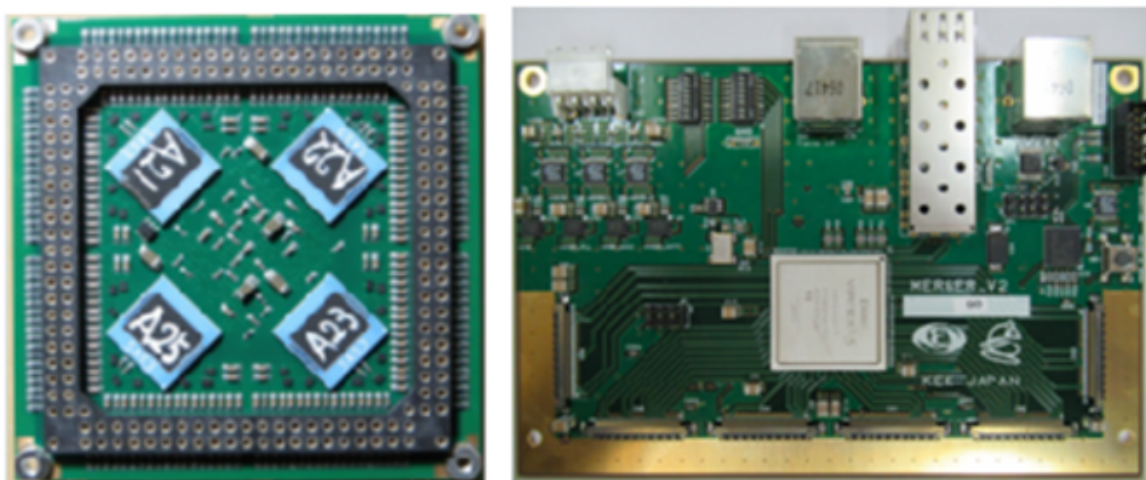


図 3.11 読み出し回路の写真 (左) FEB (右) MB

### 3.2.4 電源装置

HAPD 用電源 : HV(High Voltage)

HAPD に対する印加電圧のことを HV と呼んでおり, HAPD1 台に対して加速用電圧 (hv), 4 台の APD それぞれに独立して印加する逆バイアス電圧 (bias-a, bias-b, bias-c,

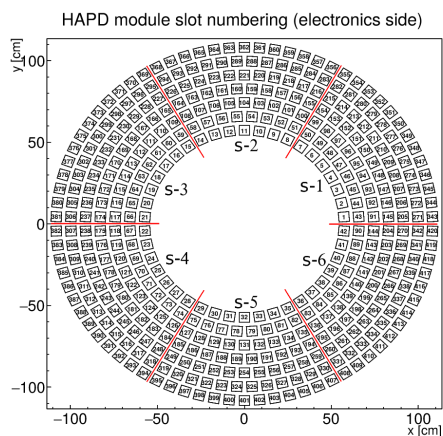


図 3.12 HAPD 番号付 赤い線はセクターの境目である。

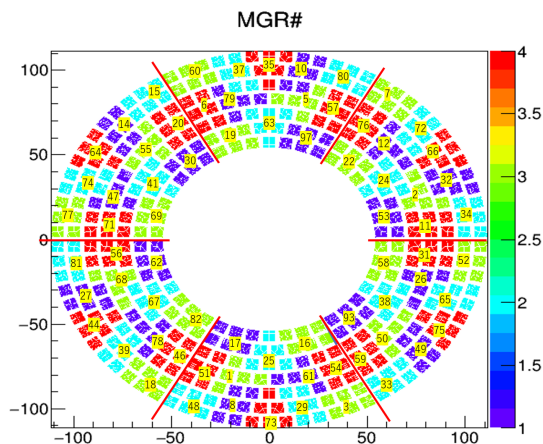


図 3.13 MGR 番号付け MB は FEB5, 6 機をまとめる。

bias-d), ガード電圧 (guard) の計 3 種類 6 系統の電圧を印加しており, これらの印加電圧の種類のことを HV type と呼んでいる.[23] また ARICH では 420 台の HAPD が使用されており, 光検出器に印加する電圧は ARICH 全体で  $420 \times 6 = 2520$  のチャンネルが必要となる. (実際にはスペア等も含め 2608 チャンネルが存在している.) HV クレートは CAEN 社の SY4527 を使用し, ネットワーク越しに操作を行う. クレートからは各チャンネルの出力電圧や電流のモニター値が操作用サーバに送られるようになっている. このクレーンを 7 台使用しており, 各クレートには 15 スロットのモジュールが入るスペースがある. ただし 8 kV の印加が行われる印加用電圧モジュールは 2 スロット分のスペースを使用する. 各スロットには 48 チャンネルのピンが備わっている.

#### 読み出し回路用電源 : LV(Low Voltage)

また, 読み出し回路に対する印加電圧のことを LV と呼んでおり, 4 種類の電圧を 1 ケーブル当たり MB3 機とその下にある FEB15~17 機 (MB は FEB5, 6 機を取りまとめる) に印加している. 72 機の MB を使用しているのでケーブル数は 24 本であり, 4 種類の電圧を印加しているのでチャンネル数は 96 チャンネルとなる. LV のクレーンは 2 台使用しており, 各クレートには 6 スロットのモジュールが入るスペースがある. 各モジュールには 8 チャンネルのピンがあり各ピンで各種の電圧を印加する. つまり 1 モジュール当たり 2 ケーブル分の電圧供給を行っている. LV クレーンは Wiener 社の MPOD systems を使用しており, これも HV と同様にネットワーク越しでの操作を行う.

### 3.2.5 冷却装置

読み出し回路等から出る熱が籠ってしまうため、ARICH 検出器では読み出し回路に対して冷却システムを設置している。

ARICH では主に冷水パイプによる冷却が採用されている。シリカエアロゲルの吸水を防ぐために窒素ガスを流しているが、これにより最内径部分はさらに冷却されている。Phase II では HAPD を固定するアルミフレームに沿ってパイプを設置することで冷却を行っていたが、FPGA が十分に冷却されず高温になってしまい、FEB は 50°C、MB は 60°C 程度になることが判明した。このため Phase II では全体の半分程度の読み出し回路しか動かすことができなかった。そこで Phase III では追加の冷却プレートを採用した。これにより熱源である MB の FPGA に直接あたるようなアルミプレートを設置することで、より効果的に冷却を行うことができる。実際に温度を FEB は 30 度、MB は 30~50 度程度に抑えることに成功した。

### 3.2.6 ARICH slow control

ARICH のネットワーク図を図 3.14 に示す。電圧供給操作やラン操作をはじめとする ARICH のサブシステムはサーバー間が Belle II 共通のネットワーク通信プロトコルでつながっており、Belle II ネットワークを介して統一された通信プロトコルによって通信している。ARICH ではこれらを 1 台の PC(arichsc) に集約し検出器全体の制御を行っている。また電源装置および COPPER ボードはネットワーク通信を介してコントロールを行うことが可能であり、設定値の変更や印加電圧値や電流値、電圧上昇下降速度などの様々な値のモニターが arichsc からできる。また長期的な安定性を監視するためにデータ収集用 PC(arichmon) での時間変動データの蓄積が PhaseIII から本格的に始まった。各モニター値に変動があった際に記録される方式をとっており、データはバイナリファイルに各変数ごとに用意されたディレクトリ内に日付毎に蓄積されている。arichsc と arichmon は読み出し機器用建屋 E-hut に置かれており、コントロールルームに設置されている端末用 PC(ariterm) から操作する。

## 3.3 運用体制

Belle II データ収集シフトとは別に、ARICH ではトラブル対応のために 24 時間体制で ARICH エキスパートと呼ばれる専用シフターがシフトを取っている。シフトには 2 種類

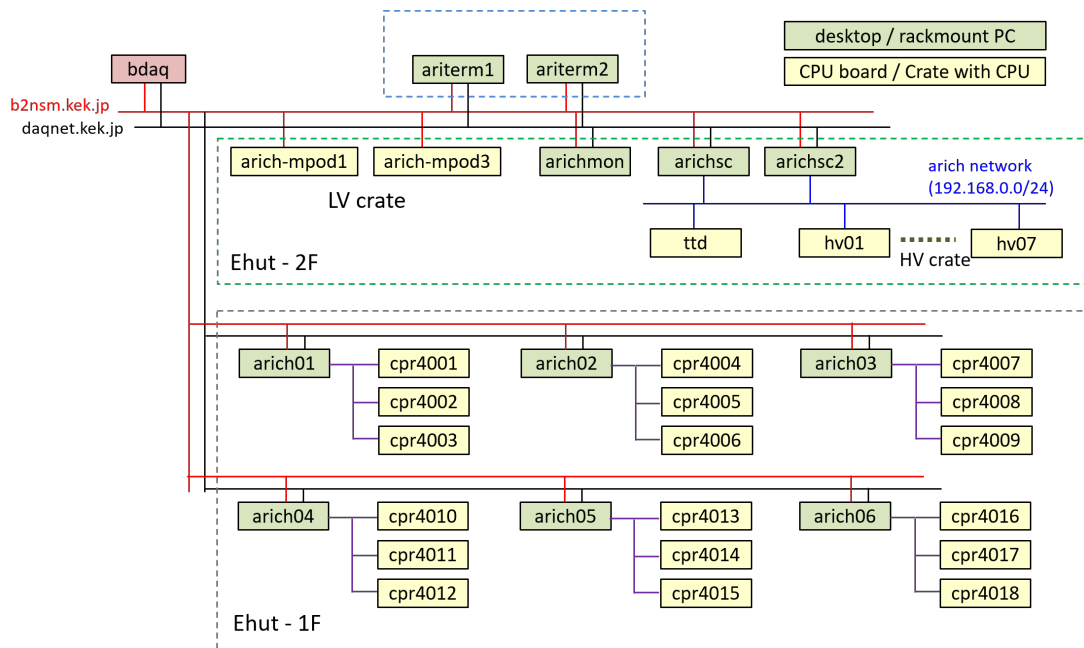


図 3.14 ARICH のネットワークマップ

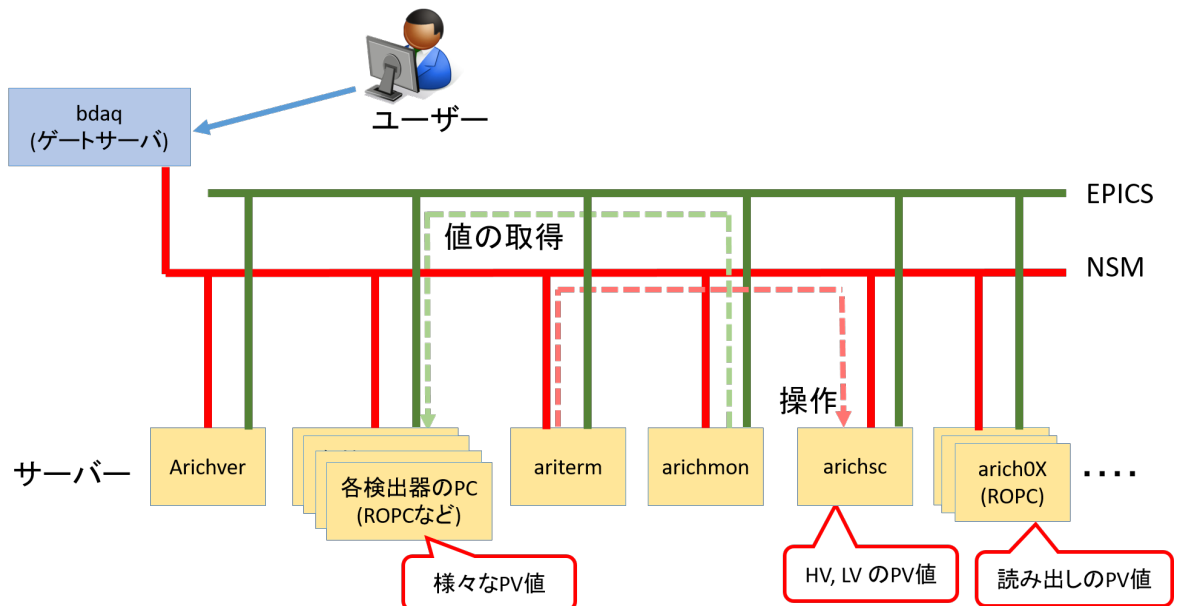


図 3.15 slow control の制御通信プロトコル

あり, KEK に常駐しているローカルシフトとリモートで操作可能であることから主に海外コラボレータがとるリモートシフトの 2 人体制で 24 時間交代でトラブルに備えている.

### 3.4 本研究の目的

本研究の目的は ARICH 検出器の光検出器に対する印加電圧, 電流や読み出し回路の温度などといった膨大に存在する ARICH 検出器に関する情報を収集・分析することで想定される異常を発見・予想するシステムの開発を行うことである. そのために, 検出器の情報をリアルタイムで確認し, そのモニター値の変動から ARICH 検出器の異常を検知し, ARICH エキスパートシフトに異常の通知と関連情報を提供することで, シフターに対して異常への迅速な対応を可能にするシステムを実現した.

## 第 4 章

# 検出器監視システムの開発

長期間の実験では様々な要因で検出器の状態は変化する。検出器の状態はデータの質に直結する非常に重要な要素であるが、しかし ARICH には膨大な数監視情報が存在する。例えば光検出器であれば HAPD1 台だけでも 6 チャンネルの電圧入力が必要であり、そのチャンネルの印加電圧、電流、クレートの状態の 3 つを監視すると考えると  $6 \times 3 \times 420 = 7560$  種類のデータがある。これらを目視で確認して ARICH の状態を把握するのは現実的ではない。また致命的な状態の変化が生じた場合は多くの情報を基にその対応を行わなければならない。そこで、本研究では ARICH の安定稼働のため検出器への監視を自動で行うシステムを開発した。このシステムは異常を発見しシフターに簡潔に情報を渡すことで状態の監視を行う。

本監視システムにおける異常の発生から検知までの概念図を図 4.1 に示す。ARICH の電圧印加は光検出器に対しては HV クレート、読み出し回路に対しては LV クレートが行うがそれと同時にクレートは arichsc に印加電圧と電流、クレートの state(ON, OFF, etc...) のモニター値を通信している。また読み出し回路内で取得された情報は COPPER ボードを経由して ROPC に送られる。arichmon は HV, LV クレートと COPPER ボードから送られるモニター値を監視することで異常を検知し、シフターに対してメールで通知を行うことでシフターによる早期の対応を可能にする。

本章では異常検知の手法と自動化について議論していく。

### 4.1 ARICH の状態

ARICH は高磁場、高放射線環境においても 10 年間動くように開発されており、放射線の影響を受けたとしてもモニター値の変動も微小である。光検出器の電圧については増幅

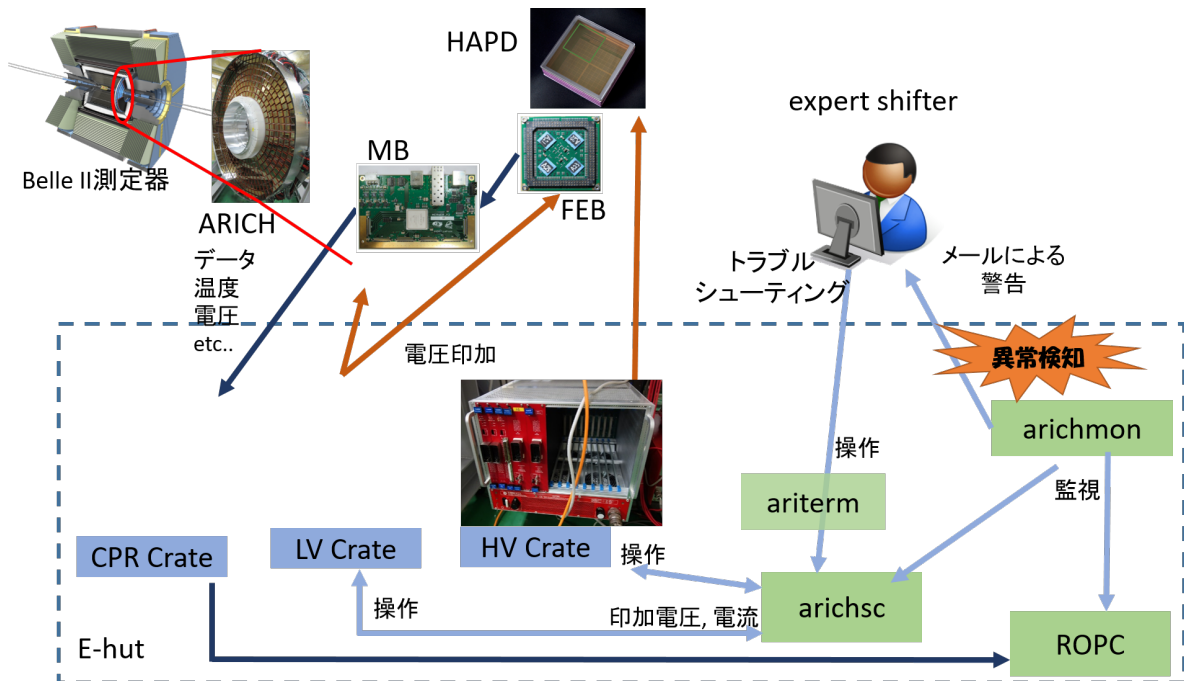


図 4.1 異常検知システム 概念図

率の変動が 1% に収まるように開発が行われており，加速用電圧  $h\nu$  において 8000 V の印加が行われた電圧印加試験では電圧のふらつきは 0.05% 程度であった [25]．その一方，急激な変化が生じた場合は装置の故障などの緊急に対応が必要となる異常の発生が疑われる．異常の発生のイメージを図 4.2 に出す．ARICH 検出器の異常は特に HV の電流値や読み出し回路への印加電圧等に現れると考えられ，異常をいち早く検出することで測定データの損失や検出器への深刻な故障を防ぐ必要がある．異常発生時のモニター値の振る舞いとそれに対応する想定される異常に対して表 4.1 にまとめた．

### HV(HAPD 用電源)

ARICH が使用する HV クレートにはチャンネル毎の印加電圧と電流をモニターする機能がついている．クレートから HAPD までを 1 周の経路としてみなすことができるためにクレート内の印加電圧，電流のモニター値を監視することで HAPD やクレート自身の状態の状態を知ることができる．例えば，電圧は非常に安定して印加されるため，モニター電圧と設定電圧に大きな違いがあれば電源ケーブルの抜けなどによる断線や HAPD の故障による短絡等の異常が考えられる．

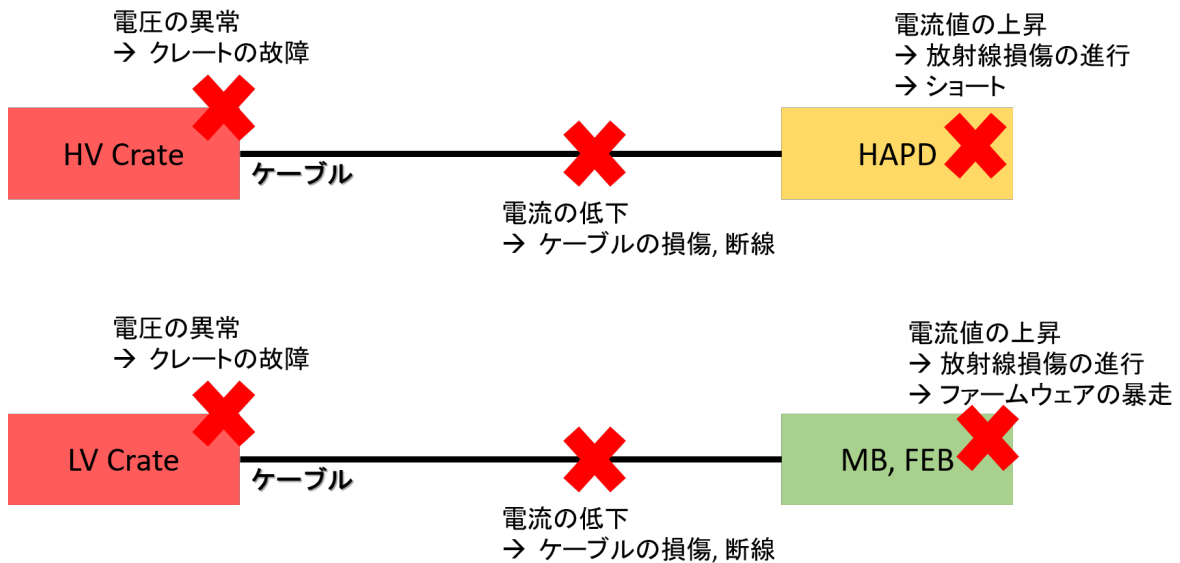


図 4.2 異常が生じる場合のイメージ図

#### LV(読み出し回路用電源)

HV と同様に LV クレートからチャンネル毎の印加電圧と電流のモニター値の取得が可能である。HV と大きく違う点は 1 系統から複数の MB, FEB に対して電圧を供給しており、さらに MB, FEB 内でも分圧が行われていることである。読み出し回路に正しい電圧値が印加されているかの確認のために FEB そのものにも実際に印加されている電圧値をモニターする機能が備わっており、クレートと読み出し回路の両方の印加電圧を監視することで異常の検知が可能となる。またほかの相違点として読み出し回路にはファームウェアが実装されており、消費電力の増大による電流値の上昇が予想されるためソフトウェア的な異常なども検知でき、回路の温度上昇などの原因を特定できる。

#### 読み出し回路の温度

FEB、MB は ASIC や FPGA 等が搭載されているが、これらは一般に熱源として振る舞う。しかし ARICH 検出器は Belle II 測定器の内層に位置しており、発生した熱を取り除くことは容易ではない。温度が上昇してしまうと HAPD や他の Belle II 検出器に悪影響を及ぼすと懸念される。実際に、Phase II では温度上昇が想定より大きく、場所によっては 60°C 近い温度を記録したため、一部の FEB のみを動作させて運用した HAPD は 50°C を超える環境では正しく運用できず、また CDC への影響も懸念される。そのため温



表 4.1 モニター値の変化と考えられる異常

	モニター値の変化	想定される原因
HV	電圧の上昇	クレート内での故障
	電圧の低下	HAPD 内での絶縁体破壊 クレート内での故障 ケーブルの損傷
	電圧の不安定	ケーブルの損傷, 接触不良 クレート内での故障 HAPD 内での損傷
	電流の上昇	放射線損傷の進行 高バックグラウンドによる影響 回路の短絡
	電流の低下	ケーブルの損傷, 断線
LV	電圧の上昇	クレート内での故障
	電圧の低下	HAPD 内での絶縁体破壊 クレート内での故障 ケーブルの損傷
	電圧の不安定	ケーブルの損傷, 接触不良 クレート内での故障
	電流の上昇	回路の短絡 ファームウェアの暴走
	電流の低下	ケーブルの損傷, 断線
温度	温度の上昇	ファームウェアの暴走 冷却システムの故障
	温度の低下	ファームウェアの停止

度は 45°C 以下が許容範囲となる。温度上昇のトラブルを監視するために FEB, MB には温度計が設置されており, MB は温度情報を読み出して ROPC に転送する。読み出し回路の異常による温度上昇を速やかに検知することで Belle II 測定器への悪影響を防止することができる。

## 4.2 システム構造

監視データの流れを図 4.3 に示す. arichsc では EPICS ネットワークへ監視データを提供するためのプログラムがいくつか動いている. HV 電圧の印加を操作するプログラムである arichhvd は CAEN が提供するソフトウェアライブラリ群を使用することで HV クレートとネットワーク通信を行い, クレートからのモニター値を NSM 情報へと変換する. LV 電圧の印加を操作するプログラムは arichlvd であり, SNMP(Simple Network Management Protocol) プロトコルを介して LV クレートとネットワーク通信を行い, クレートからのモニター値を NSM 情報へと変換している. FEB, MB にて取得された情報についても Belle2link を制御するプログラムである cprcontrold によって NSM 情報に変換されており, ROPC へと転送される. このようにして変換された NSM 情報は arichsc や ROPC で動いている Belle II 共通のプログラムである nsm2cad によって NSM 情報から EPICS 情報へと変換される. さらに AEICH の構造体の温度は温度ロガーにおいて記録され EPICS へと置かれる. ARICH 検出器内の監視情報に加えて Run の情報やビーム電流などのといった Belle II 測定器全体にかかわる情報も EPICS ネットワークを介して取得することができる. 取得した情報は arichmon においてデータを収集するプログラム ca2file によって arichmon 上にあるディスクスペースにバイナリファイルとして記録される. データ量を減らすため, データは前回記録されたモニター値から変動があった際に追記される.

### 監視データの命名規則

arichmon 上で収集している監視データは Belle II 実験内の EPICS 情報に関する命名規則に従って図 4.4 のようなディレクトリ構造に蓄積されている. ca2file では取得した監視データごとにディレクトリを生成しており, 取得した日ごとにバイナリファイルを作成する. バイナリファイルには取得時間とモニター値が記録されており, それぞれのデータ型は 32bit UNIX time, モニター値に合わせて 32bit int(整数), 32bit float(浮動小数点実数), 可変長 null ターミネート文字列である.

## 4.3 アラートメール

異常検知システムは異常の検知が主な役割であり, 検知後の対応はシフターが行う. よってシステムにはシフターに対して速やかな通知と対応に必要な情報の提供が求めら

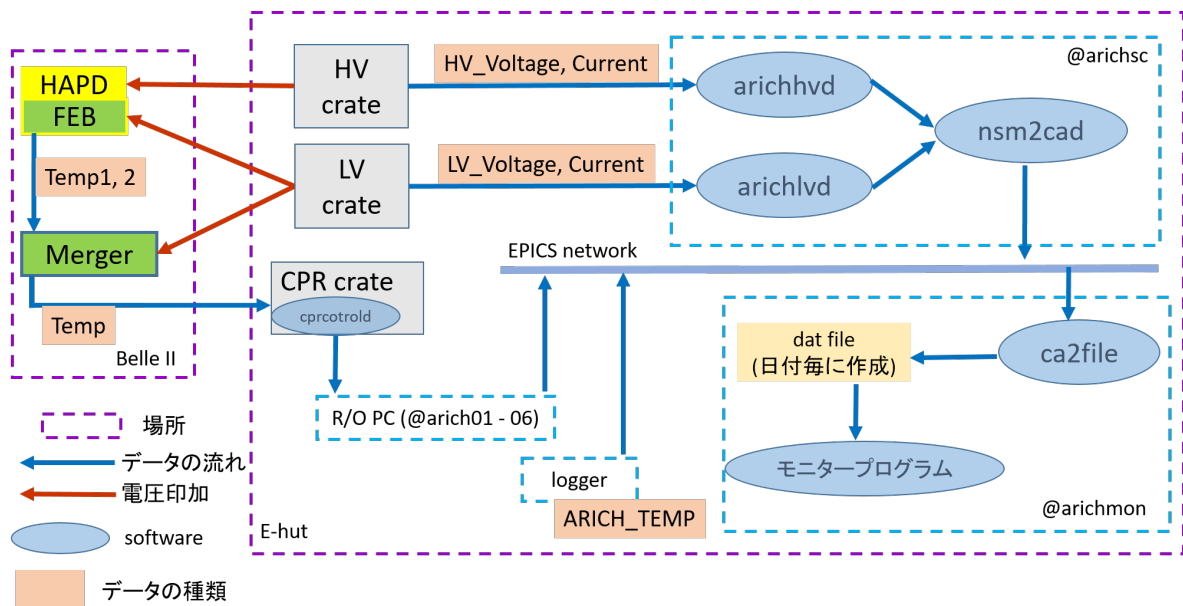


図 4.3 slow monitor データの流れ

れる。このシステムにおいてはその通知を電子メールを利用し、情報の提供をウェブインターフェースにて行った。通知と情報の提供に至るまでの流れを図 4.5 に示す。

同じ種類の異常判定条件でも閾値や超過回数を変えることで重要度の異なる異常を検知できるように、2019c 期間での異常判定条件では Warning レベルと Infomation レベルの 2 つを用意した。Warning レベルの条件を満たしたモニター値はシフターにアラートメールを通知することで異常に対して対応を促すが Infomation レベルの条件を満たしたモニター値に関してはアラートを出さず記録を残すのみとした。またメールを 1 度送信したらしばらくは (最終的な設定では 3 分) 送信しないように設定を行った。

### 4.3.1 ウェブインターフェイス

ROOT (CERN が開発がしたデータ解析用ソフトウェアライブラリ群)[26] を使用することでグラフやヒストグラムを拡張子.root のファイルとして保存をすることが可能である。この root ファイルをウェブインターフェース上に表示することでシフターがアクセスしやすい情報提供を行う。グラフをウェブ上に表示する方法として JSROOT(JavaScript ROOT)[27] を使用した。JSROOT を利用することで root ファイルの内容をブラウザ上で表示させることができる (図 4.6)。また図 4.5 ではウェブサーバーとしているが、これにより KEK ネットワークへの VPN を持っていれば KEK 外にいるユーザーでも閲覧

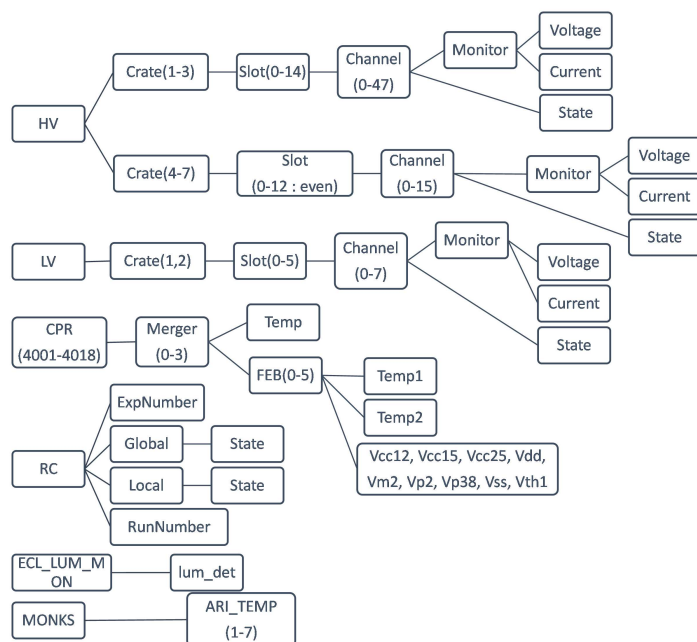


図 4.4 arichmon 上で蓄積しているモニター値の命名規則, arichmon 上のディレクトリ構造を安易にした

ができることからリモートシフトや KEK に滞在していないエキスパートも同様の操作でグラフ閲覧ことができる利点がある。

### 4.3.2 メール上の情報

シフターはアラートメールを受け取り、メールにある情報を基に電源のシャットダウン等、その後の対応を決める。よってメールにはシフターが異常に対応するために必要な情報を添付しなければならない。現在メールに添付される情報について表 4.2 にまとめた。

アラートメールで通知された異常についてシフターが対応を行う際、まずは異常が生じたチャンネルの時間変動を確認すると想定される。そこでメールを送る際に異常の検知されたチャンネルの 10 日分の時間変動グラフを作成し、ブラウザ上で見れるようにし、グラ

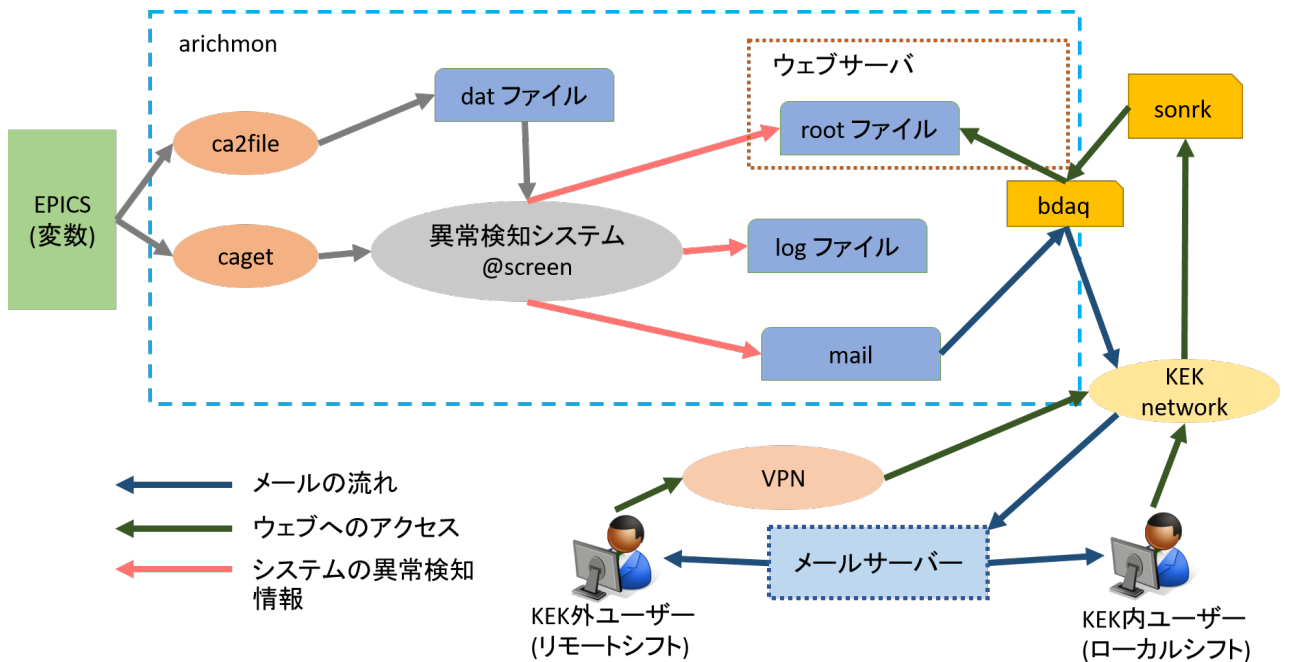


図 4.5 シフターに対する情報提供の流れ

異常検知システムは ca2nsm を通すことで EPICS からモニター値をリアルタイムで取得し、異常の判定を行っている。システムが異常と判定されるチャンネルを検知した場合、そのチャンネルの時間変動グラフを dat ファイルから作成する。作成されたグラフは root ファイル形式で保存され、ウェブサーバーに置かれる。その後 root ファイルの置かれた場所へのリンクと以上に関する情報が書き込まれたメールが送信される。シフターはメールを受け取った後、書き込まれたリンクへ KEK ネットワークからプロキシサーバー (snork) を通してアクセスすることで異常と判定されたチャンネルの時間変動を閲覧することができる。

フの表示ページへの URL(ハイパーリンク) をメールに記述することで 1 クリックでグラフ表示画面に到達し、素早い確認を行えるようにした。この時間変動は jsroot を使用することで、root ファイルをブラウザで表示している。実際のアラートメールの一例を図 4.7 に示した。

## 4.4 システム実装

異常検知システムは予想された値から逸脱したモニター値を検知するものである。本システムでは監視データ毎に上限と下限の閾値をあらかじめ決めておき、閾値を超えると異常と判断しメールを介してシフターにアラートを通知するというアルゴリズムを開発し

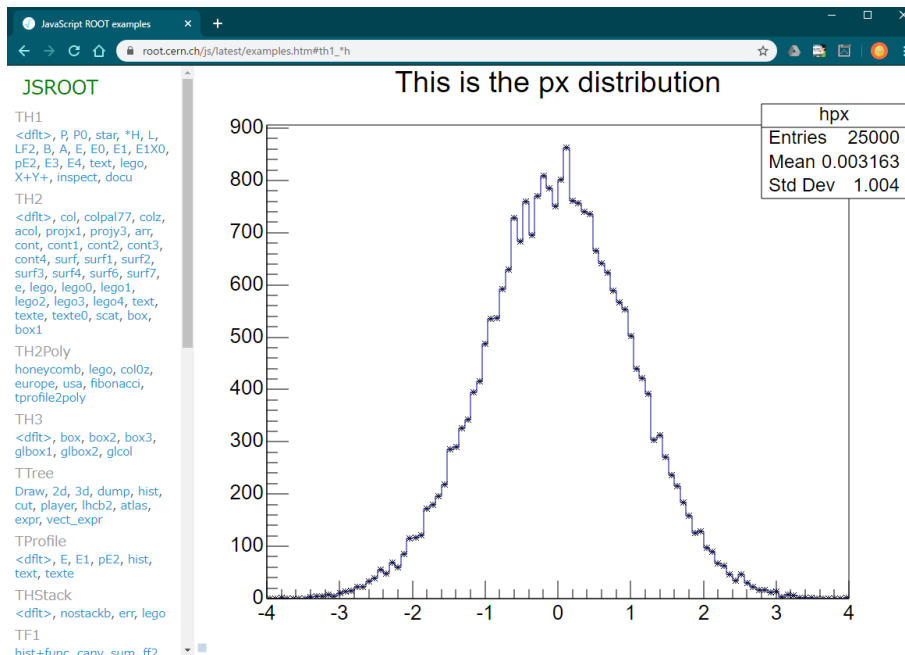


図 4.6 jsroot による表示の例 [27])

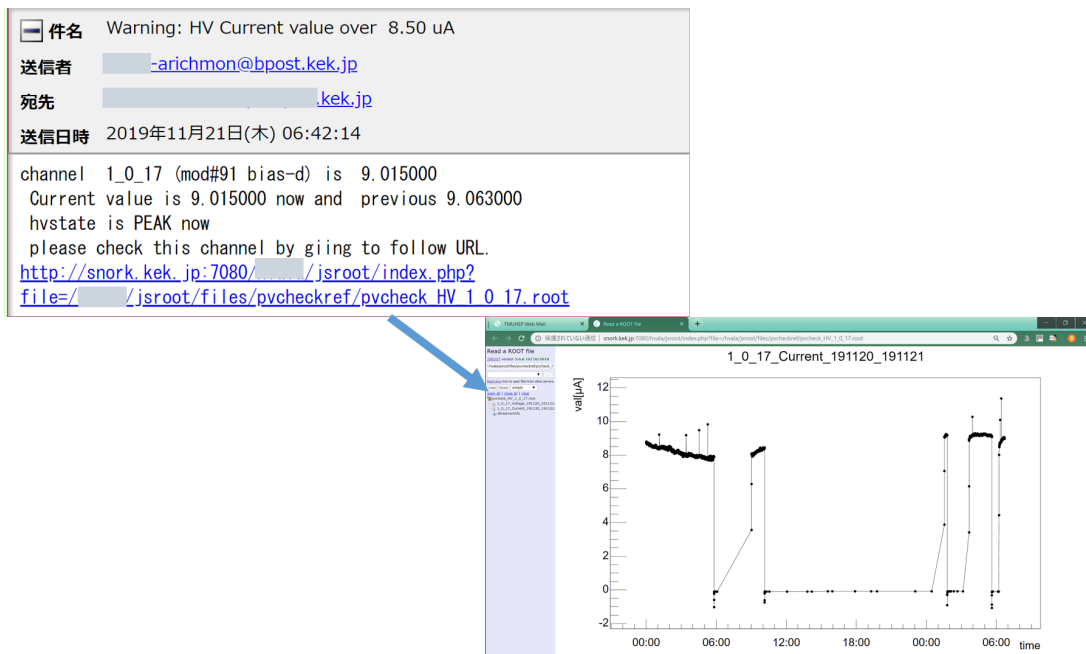


図 4.7 アラートメールの例 メール内のリンクから直近の時間変動を閲覧することができる。

表 4.2 メールに添付される情報一覧

	内容	備考
共通項目	異常の種類	メール件名に表示
	設定閾値	
	異常検知時の PV 値	
	HV State	HV 全体の状態
	チャンネル番号	crate-slot-channel と module 番号-HV type 2 通りの表記
	時間変動	ウェブインターフェイス使用
連続上昇, 低下	初期値	連続変化が生じた最初の PV 値
上限下限の超過	前回判定時時の PV 値	
急激な変化		
	変化量	前回判定時からの変動

た. そのため閾値の決め方が異常検知システムの性能を決める重要なパラメータとなっている. 閾値は監視データの履歴にあるモニター値の分布から決定した. しかし 2019 年は PhaseIII が始まった年であり, 本格的な物理測定が始まったばかりであったため, 安定状態に関する情報がほとんどなかった. そのため異常についての知見がまだ少なく, 閾値については運用の中で調整をおこなった. 特に春と秋の実験期間でシステムの内容は大きく変更がなされたため, 春と秋の実装したシステムについて別々に説明する.

#### 4.4.1 2019 年春の実験期間 (2019a) での実装

2019a 期間で開発されたシステムでは HV の電流と読み出し回路の温度のモニター値を対象に監視を行う. また, 正しく異常を検知するために一つ一つのチャンネルに対して個別に閾値を決定した. そのために, 異常検知の基準とするリファレンスデータを長時間の安定した物理測定中のモニターデータから作成し, リファレンスデータから閾値を個別に設定を行った. 使用したデータは 2019 年 5 月 30 日 04:27~07:33 の 3 時間 5 分の間に Belle II 測定器による物理データ取得が継続して行われた時のもので, 期間中の監視データの変動は正常は範囲にあると仮定して閾値を決定した. なお各モニター値のリファレンスデータの様々な統計情報について平均値を表 4.3 にまとめた. この期間のデータについ

て HV の電流と読み出し回路の温度について各チャンネルでモニター値の分布をヒストグラムにし, そのヒストグラムの平均, 標準偏差から閾値を決定した. 当初は閾値  $V_{th1}$  は平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  を使って

$$V_{th1} = \mu \pm n\sigma, \quad (4.1)$$

と閾値を決定した.  $n$  の値はリファレンスデータでの値が閾値の範囲内に収まるような幅になるようにした. 図 4.8 の例では  $n = 3$  として上限下限を決定した.

本システムでは 1 回のプログラムの実行につき各監視対象 (HV の電流, 読み出し回路の温度) それぞれについての全チャンネルにおいて閾値との比較を行う. アラートが通知される条件として, 1 度プログラムを実行した際に閾値を超過したチャンネル数が, HV の電流モニター値の場合は 10~1000 チャンネル, 読み出し回路の温度については FEB, MB の温度センサーごとに合わせて 3 チャンネルを超えた場合と設定した. また全チャンネルでの比較は 25 分程度かかることから, 30 分に 1 回の周期で異常検知プログラムを実行した.

本システムの運用結果についてまとめる. 閾値を超えたモニター値を検出しシフターにアラートを通知するというアルゴリズム自体は動いたものの, アラートはほとんどが異常ではないケースであり, 対応ができないほど多くアラートが出てしまい, 有効な異常検知ができたとは言えなかった. アラートはプログラムの実行周期ごとに通知され, 閾値を超えたチャンネルの平均は HV の電流モニター値では 1115.06 チャンネル, 読み出し回路の温度モニター値では 74.66 チャンネルであった. 全チャンネルが HV の電流のモニター値は 2608 チャンネル, 読み出し回路の温度は 912 チャンネルなのでそれぞれ 42%, 8% において常時異常が生じていることになる. こうした大量のアラートが出現する原因として考えられるのは ARICH 検出器の運転状況の変化と運転中の安定性の高さである. 運転状況については Belle II 測定器は日中は加速器, 各検出器の調整や宇宙線測定等を行い, 夜間では物理データの取得を行うなど時間帯によって運転状況が異なる. これは Belle II 測定器の運転が開始したばかりであり, 加速器や検出器において調整をしつつ段階的に性能を上げているためである. よって ARICH 検出器も日中と夜間で検出器の状態が変化し, 調整による設定値の変更などが行われたため, リファレンスデータの作成に使用したデータの取得状況との差が生じたため, 正常値がリファレンスデータからのずれが発生したためである. また ARICH 検出器は安定性の高いものであり, リファレンスデータも 1 区間の安定した状態でのデータを使用しているためその分散値は非常に小さいものであった. 以上の点からある安定した状態におけるデータをリファレンスデータとして使用し続ける方式では ARICH の変化に追従できず難しいことが分かった.



表 4.3 リファレンスデータの取得状況

モニター値	エントリー数	データ取得周期 (エントリー/分)	平均値	分散値
加速用電圧	17.85	0.2	0.699 $\mu\text{A}$	0.0018 $\mu\text{A}$
HV 電流	逆バイアス電圧 (a)	2789	0.241 $\mu\text{A}$	0.0541 $\mu\text{A}$
	逆バイアス電圧 (b)	2851	0.225 $\mu\text{A}$	0.0452 $\mu\text{A}$
	逆バイアス電圧 (c)	2841	0.226 $\mu\text{A}$	0.0363 $\mu\text{A}$
	逆バイアス電圧 (d)	2865	0.239 $\mu\text{A}$	0.0446 $\mu\text{A}$
	ガード電圧	3945	21.33	-0.076 $\mu\text{A}$
温度	MB	541.7	34.8°C	0.278°C
	FEB(HAPD 側)	565.4	36.3°C	0.374°C
	FEB(MB 側)	522.7	36.3°C	0.426°C

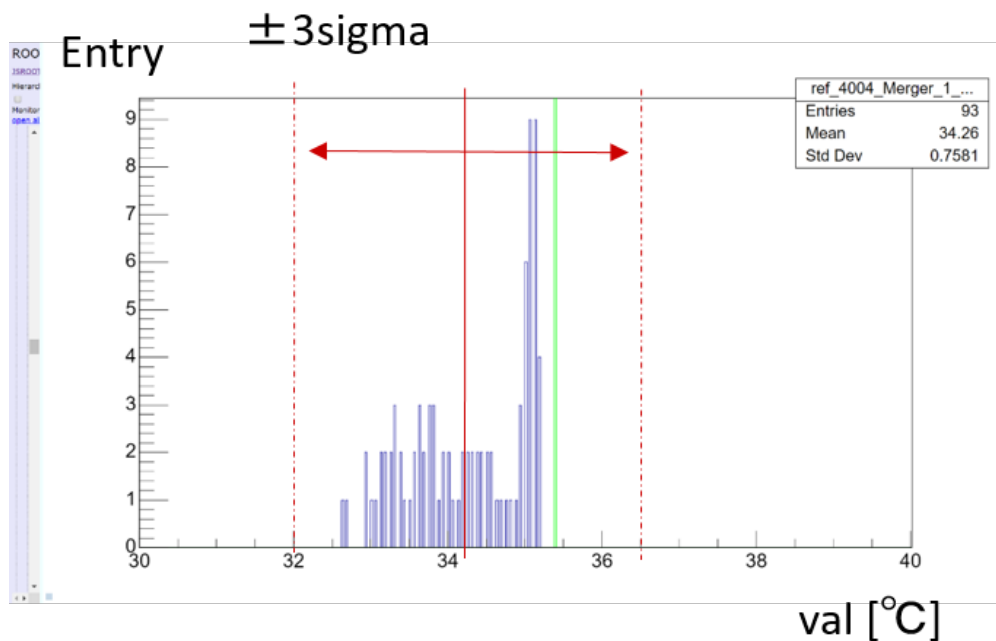


図 4.8 2019a 期間における閾値の決め方, COPPER ボード-4004, MB-1 から読み出された温度データのプロジェクトン. この平均値 (直線) とそこから  $3\sigma$  離れた区間 (点線), この区間内にモニター値が収まっていなければ異常と判定する. 緑の線は現在のモニター値であり, この場合は正常と判定される.

#### 4.4.2 2019 年秋の実験期間 (2019c) での実装

2019a 期間における異常誤検知の大量発生を改善するために、2019c 期間においては原則として各監視データのカテゴリごとに共通の閾値を決定し、さらに超過の回数を異常判定の条件に含めることで異常の誤判定を減らした。ただし HV の電流値に対しては表 4.4 に示す 6 チャンネルで閾値を個別に設定した。これらのチャンネルは他のチャンネルより特出した値を記録しており、チャンネル共通の閾値の設定が難しかったため、例外的に別の閾値を設定した。また、ノイズやビームバックグラウンド等の影響で HV のモニター値が一瞬ぶれてしまうことがあり、閾値の 1 回の超過を検出しただけでは異常と判断するには不十分であるため超過の回数を異常判定条件に含めた。2019a 期間では異常判定条件を上限下限についてのみ設定したが、2019c 期間では複数種類の閾値を設定することで想定される様々な異常を検知できるようにした。

各異常判定条件の種類は大きく分けて検知する異常の種類とその重要度に関するレベルの 2 つに分類できる。異常の種類について、上限下限の超過に加えてモニター値の変動に対して大きさや傾向についても閾値を設定した。すなわち、前回判定時に使用したモニター値との比較を行うことで前回からの変化量を算出し急激な変動や連続した傾向に対しても異常と判定を行う。検知できる異常の幅を広げ、より精度の高いシステムの開発を目指した。閾値のレベルに関しては §4.3 にある通り、Warning レベルと Infomation レベルを設定し、シフターにメールで通知をするのは Warning レベルの異常のみで、Infomation レベルの異常は記録を残すのみとした。14 日間 (11 月 22 日 ~12 月 4 日) の間に記録された件数を 4.5 にまとめた。ただしログが記録されていた閾値は変動と上限についての閾値のみであり、また温度のログは記録がなされていなかったため割愛した。Infomation レベルの異常に関しては、過去に同様の異常が検知されたが、測定データには異常が見られず検出器に異常が確認されていないケースを対象としている。

2019a からの別の変更点として監視するモニター値に HV の電圧を追加し、最終的に HV の電流と電圧、読み出し回路の温度のモニター値を対象に監視を行うシステムを開発した。HV の電圧に関しては非常に安定している点から蓄積されたデータ量が少ないためファレンスデータの作成が難かしく、2019a 期間での実装は行わなかった。しかし 2019c 期間で使用する閾値は 2019a 期間で蓄積されたデータを使用し、また各チャンネルではなく全チャンネルにおけるデータを使用して作成する。そのため HV の電圧についても十分なデータ量を使用した閾値の作成を行うことができ、監視対象に加えることができた。閾値は 2019a 期間と同様に運用していく中で変更を加えた。最終的に決定された閾値

を図 4.9 にまとめる.

またシフターに通知するアラートメールに関しても調整を行った. 全ての異常判定条件の超過に対してメールを送るとシフターが対応できない件数のメールが送られる場合がある. これは一度基準を超えてしまうと, その異常が収まるまでアラートが連続的に出る場合や, 閾値が適切ではなく正しく異常が検知できていないことが考えられる. そこで一度メールを送信したらしばらく (最終的な設定では 3 分) メールを送信せず, さらに閾値を超えた回数の記録をリセットする設定にしている. これにより短時間でのメールの大量送信が抑えられ, かつ異常が解決していない場合は以降も定期的にメールを送信することができる. さらに Warning レベルのアラートのみをメールで通知するようにし, Information レベルのアラートはログに記録は残すが通知はしないように設定した. 実際この設定を適用する前は HV の電流においては平均 17.9 通/日のメールが送信されていたが, 適用後は平均 2.8 通/日に減少した. アラートメールの送信件数の時間変動について図 4.10 にまとめる.

表 4.4 例外的に設定した閾値

モジュール番号	HV type	閾値 [ $\mu\text{A}$ ]
84	加速用電圧	7.5
25	逆バイアス電圧 (A)	6.2
77	逆バイアス電圧 (A)	6.0
365	逆バイアス電圧 (A)	7.3
91	逆バイアス電圧 (D)	9.4
25	ガード電圧	5.5

本システムを運用していく中で 11 月 12 日 16 時 23 分に重大な異常について検知が行われた. 検知された異常は HV の電圧についてであり, モジュール番号 311 の加速用電圧において急激な低下が発見された. その時の電圧値の挙動を図に 4.11 示す. 加速用電圧には 2019c 期間においては 6000 V の電圧が印加されている. しかしこのチャンネルにおいて電圧が急に低下し, HV システムにおいてエラー状態 (TRIP) であると表示され, 測定を行えなかった. シフターは異常が発見されたチャンネルに対する電圧印加を無効にすることで測定を行った. このチャンネルに対しては翌々日に再び電圧を印加したところ, 6000 V の状態が 4 時間ほど続いたのち同様の電圧低下が検知された. これは実際にアラートが出された後シフターによる適切な対応ができた例である.

表 4.5 Infomation レベルの異常のログ数

モニター値	閾値の種類	Infomation ログ件数	
HV 電流	hv	1	
	bias-a	986	
	bias-b	355	
	bias-c	急激な変動	533
	bias-d	758	
	guard	21	
	hv	1	
	bias-a	435	
	bias-b	119	
	bias-c	上限値	197
	bias-d	285	
HV 電圧	guard	670	
	hv	1417	
	bias-a	1299	
	bias-b	1543	
	bias-c	急激な変動	994
	bias-d	1555	
	guard	415	
	hv	13316	
	bias-a	0	
	bias-b	0	
	bias-c	上限値	0
	bias-d	0	
	guard	0	

variable	threshold type	value [uA]	times	level	remark	
HV Current	differ	5	5	Information		
		5	20	Warning		
	limit	5	5	Information	There are some exception channel	
		5	50	Warning	There are some exception channel	
		10	10	Warning		
	continuous trend (+)		50	Information		
	continuous trend (-)		50	Information		
variable	threshold type	value [V]	times	level		
HV Voltage	differ	1	5	Information		
		1	10	Warning		
	(hv)	limit	6050	5	Warning	
	(bias)		370	5	Warning	
	(guard)		180	5	Warning	
	(hv)	5950	5	Warning		
	(bias)	330	5	Warning		
	(guard)	150	5	Warning		
		continuous trend (+)		50	Warning	
		continuous trend (-)		50	Warning	
variable	threshold type	value [°C]	times	level		
Temp	differ	3	1	Information		
		3	5	Warning		
	limit	42	1	Information		
			30	Information		
			30	Information		
		continuous trend (+)		50	Warning	
		continuous trend (-)		50	Warning	

図 4.9 最終的な閾値一覧 各モニター値に対して変動量, 上限下限値, 変動傾向の 3 種類とそれぞれに対して異なる値と回数を設定してレベル分けを行っている。

本システムの問題点についてまとめる。最大の課題は閾値の設定である。本システムでは閾値は各監視データごとに全チャンネルに対して同様の値を設定していた。2019c 期間に実装されたシステムはモニター値の極端な変動の検知は可能であるが、相当極端な変動かチャンネルのモニター値の挙動が全体の平均からずれているものに対してのみ有効であり、モニター値の変化から異常の前兆を検知する、もしくはより精度の高い異常検知を行うためには個別の閾値の設定が必要である。また別の問題点として温度のモニターシステムが挙げられる。温度のモニターシステムに関しては異常の検知はなされず出されたアラートはすべて誤検知であった。その原因は主に読み出し回路に対する電源のスイッチによるものである。電源が OFF になると熱源である ASIC や FPGA は停止するため ARICH 内の温度は低下する。その後電源を ON とされると再び ASIC や FPGA から熱

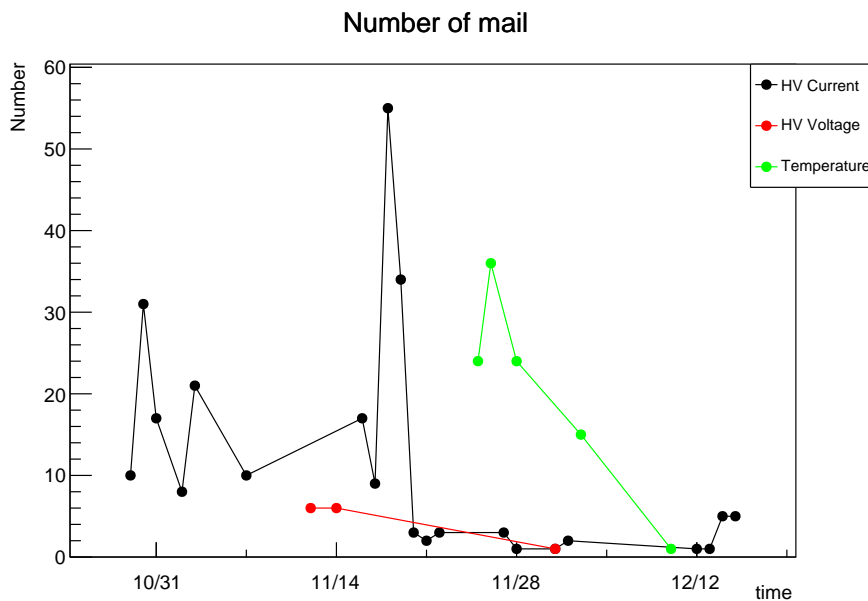


図 4.10 アラートメール送信頻度 図中の“メール送信頻度設定変更”のタイミングで設定を変更した。

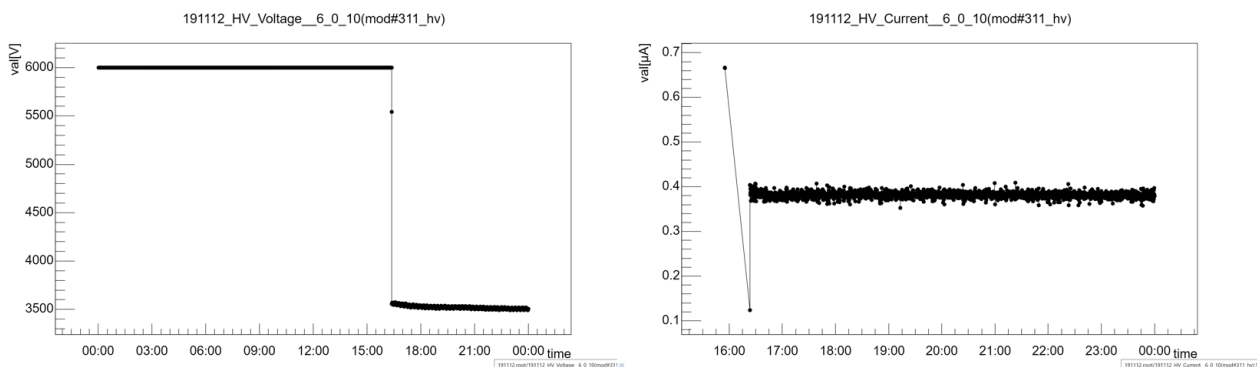


図 4.11 電圧の異常な低下

が発せられ、検知システムはこれによる温度の連続上昇を検知する。これは想定されている温度上昇であり、これによるアラートは異常ではない。この問題に対しては電源を ON にしてからの一定時間において連続上昇に関する検知を止めることで解決ができると考えられる。しかし電源が ON になった直後は異常が生じやすいタイミングでもあり、これに対しては異常が検知できるようにしなければならない。異常判定条件の改良や停止時間の調整が必要である。

## 第 5 章

# ARICH の長期安定性可視化の開発

### 5.1 目的

4 章で記述した異常検知システムは緊急性の高い異常についての検知, 通知を目的としているため, 全体的な長期安定性についての監視は別のシステムが必要である. またアラートメールには異常が検知されたチャンネルについての情報のみが添付されている. そのためエキスパートが他のチャンネルについて, もしくはさらに過去の日時についてのデータを参照したいときはアラートメールは情報源にならない. そこで長期間の様々な情報を提供するためのウェブインターフェースを構築した. その概念図を図 5.1 に示す.

### 5.2 ウェブインターフェイス上での可視化

arichmon ではモニター値をバイナリファイルに記録することで長期的なモニターデータを蓄積しており, データファイルを解析することでモニター値の長期における変動を確認することができる. 本研究では HV と LV の電流と電圧についての 1 日ごとの時間変動を閲覧できるウェブページを作成した. ウェブインターフェースに情報が表示されるまでの手順は

- データの解析および root ファイルへの結果の保存
- グラフの表示されるページへのリンク集である HTML ファイルの作成
- root ファイルと HTML ファイルのウェブサーバーへのコピー

となる. 毎日 00:10 に Linux cron によってこれらのデータ解析処理が実行され, ウェブインターフェースの更新が行われる. 更新されるグラフは HV クレート, LV クレートに対

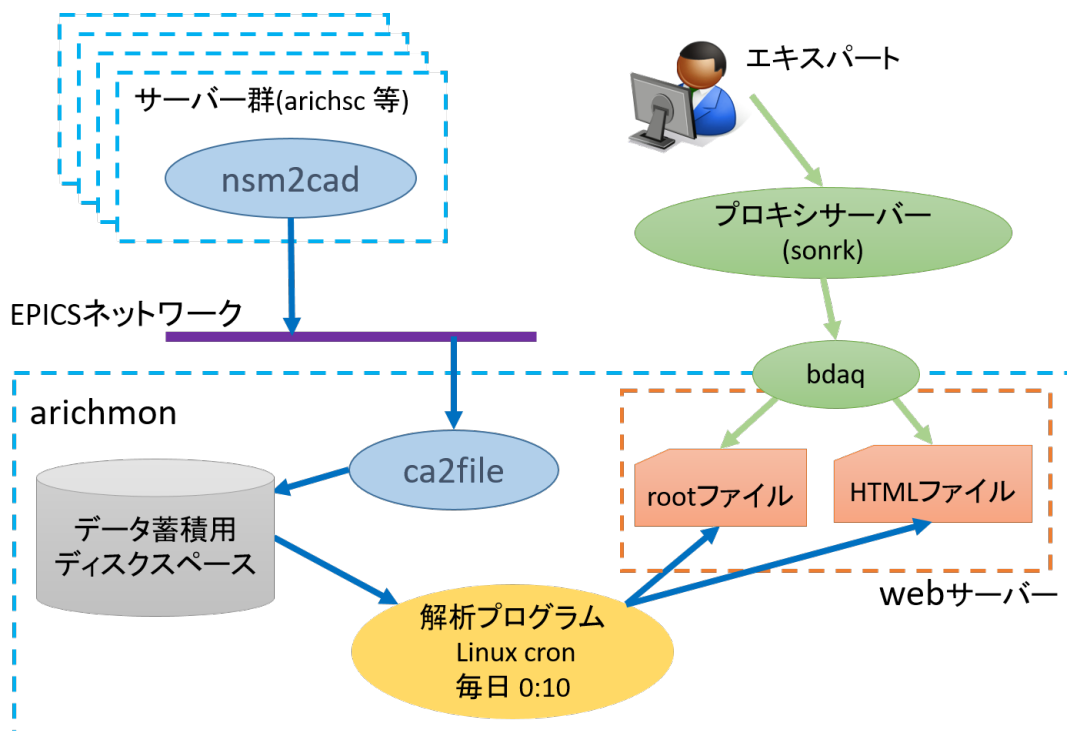


図 5.1 ヒストリー作成の概要図 プログラムが Linux OS 上の cron プロセスによって毎晩 0:10 に実行されると root ファイルとサマリーページである HTML ファイルが作成され、ユーザーは snork を通して過去のデータを閲覧できる。

して各チャンネルの電流、電圧の時間変動と各モニター情報をリング単位、セクター単位で集計した平均値の時間変動について 1 日単位で作成されている。

ARICH の持つ情報は多岐にわたり、そのため作成したウェブページは複数の階層構造を持つ。図 5.2 に作成したウェブページのスタートページを示す。スタートページには日付ごとに HV の電流と電圧について HV の種類ごと、LV の電流と電圧について設定電圧の系統ごとのサマリーページへのリンクが張られている。このサマリーページについてはスタートページで書かれた日付のデータがまとめられており、毎日の更新の際に昨日の日付とリンクがスタートページに追記される。このサマリーページにははその変数の 1 日分の各チャンネルの時間変動、全チャンネルのプロジェクト、セクターごとの平均値の時間変動、HV はそれに加えて各リングごとの平均値の時間変動が表示されるページのリンクが書かれている (図 5.3)。またリンクの各チャンネルの番号付けもクレートからの出力によって割り当てられた番号と構造 (位置) から割り当てられた番号の 2 通りの表記がなされている。これによってブラウザの文字列検索機能を使用することで見たいチャンネル



ルの時間変動を好きな番号方式で検索、閲覧することができる。また HV の各チャンネルの時間変動以外は小さな窓が用意されており、グラフが安定しているかどうかの判断程度ならこのページで確認ができるようになっている。サマリーページにあるリンク先には時間変動グラフ、モニター値分布が表示されるようになっており、グラフ軸の拡大縮小やグラフ点の情報の取得などが容易に可能である。

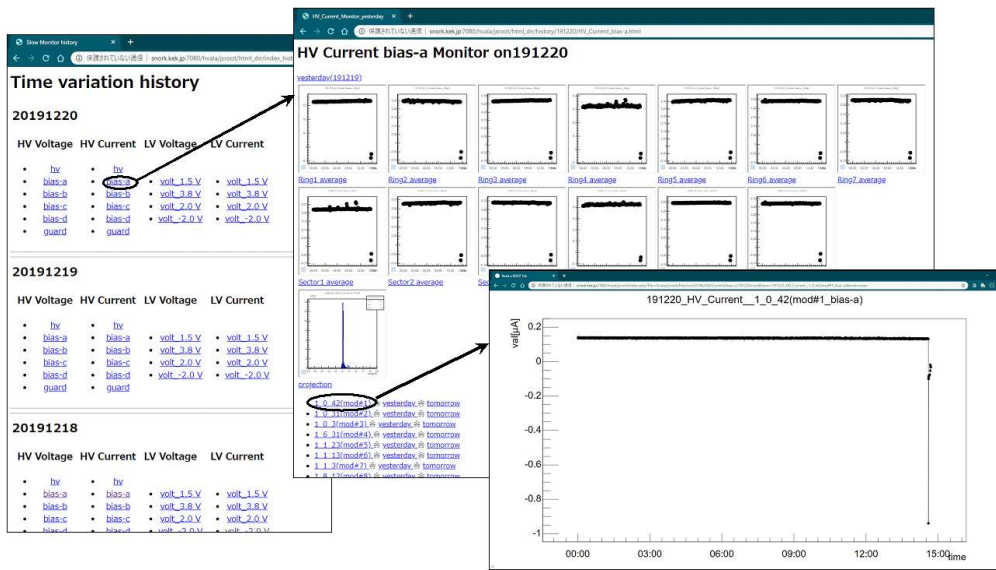


図 5.2 作成したウェブページ スタートページ (左):毎日上部に追記がなされる。サマリーページ (中央):各解析結果へのリンク集, 一部のグラフ以外は安易的な目視が可能である。グラフページ (右):各解析結果のグラフがあり, グラフに対し様々な操作が可能である。

### 5.3 モニター値の長期的な変動

2019 年は本格的な実験段階である Phase III が始まった年であり, また ARICH 検出器においては初めて全 HAPD を使用した運用を本格的に行った。この年の長期的な時間変動を見ることで, ARICH 検出器の状態について議論する。

モジュール番号 1(図 3.12 参照) の HAPD の印加電圧, 電流とその HAPD に接続され

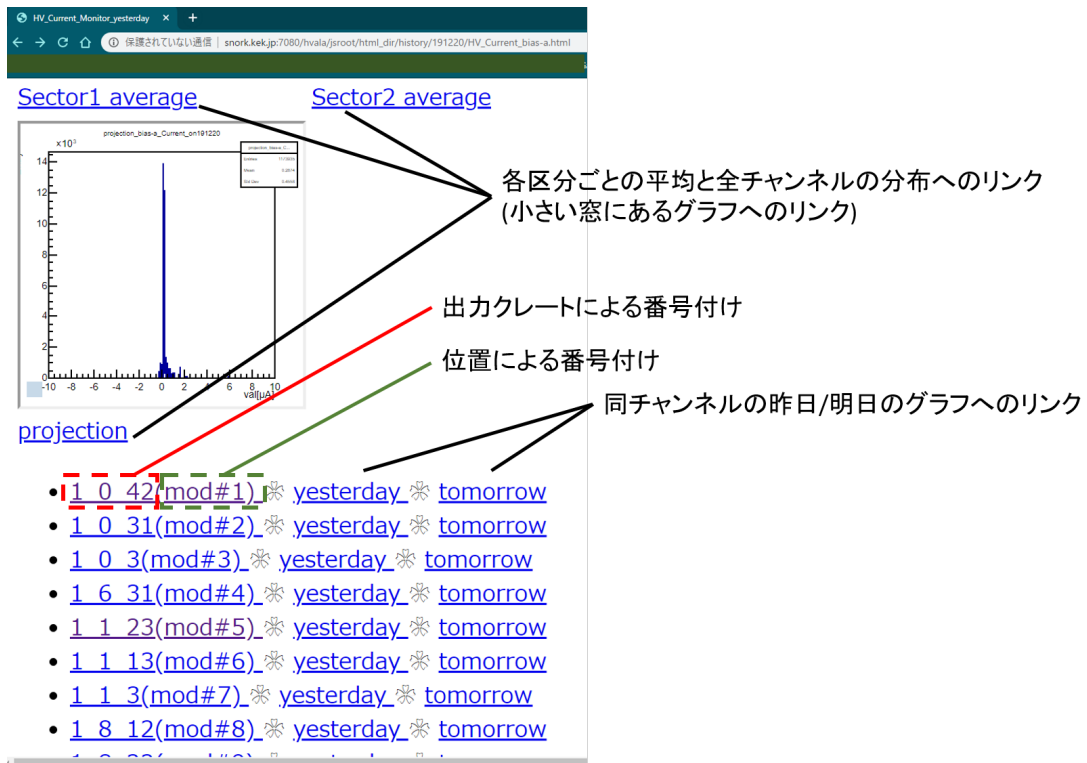


図 5.3 作成したウェブページ サマリーページ

ている読み出し回路の温度の時間変動を平均的な変動の例としてそれぞれ図 5.4, 図 5.5, 図 5.6 に示す. これらのチャンネルについて HV の電源の ON/OFF に合わせて印加電圧, 電流の上昇下降が見えており, LV の電源の ON/OFF に合わせて温度の上昇がみられる. また印加電圧と温度に関しては ON/OFF のタイミング以外では安定しており, 正常なチャンネルの振る舞いとして期待通りのものである. また, このようなグラフの傾向(形)は多くのチャンネルのグラフで見られるため, モジュール番号 1 の HAPD への印加電圧, 電流およびその HAPD に接続される読み出し回路の温度はおおむね平均的な形であると判断する.

春の実験期間の温度グラフにおいて 6 月 25 日に温度の上昇が見られるがこれは冷却装置の故障によって ARICH 検出器内が冷却されなくなったために生じた変動であり, このような変動が長期の時間変動グラフから見てとれることが確認できた. このような温度上昇に対しては原因が判明し, 今後は同様のトラブルに早期に対応できると考えられる.

### 5.3.1 異常検知されたチャンネルの変動

2019c 期間で実装をしている異常検知システムを運用している中で、他のチャンネルとは異なる変動を行うチャンネルが4つ見つかった(図 5.7). HV の電流値は平均  $\sim 0.6\mu\text{A}$  程度だが、これらのチャンネルに関しては電流値が平均に比べて高く、かつ挙動に特徴的な傾向がみられた. 実際図 5.7 左上のモジュール番号 365 の逆バイアス電圧を印加するチャンネルは HV クレートの状態においてエラーを表示した. このチャンネルに関しては電圧印加を無効としたが、この異常の原因については不明である. 他の3チャンネルについては電流値が高いこと以外は問題なく動いているが、今後このような変動をするチャンネルについては異常が生じる可能性が高いので、特に注視していく必要がある.

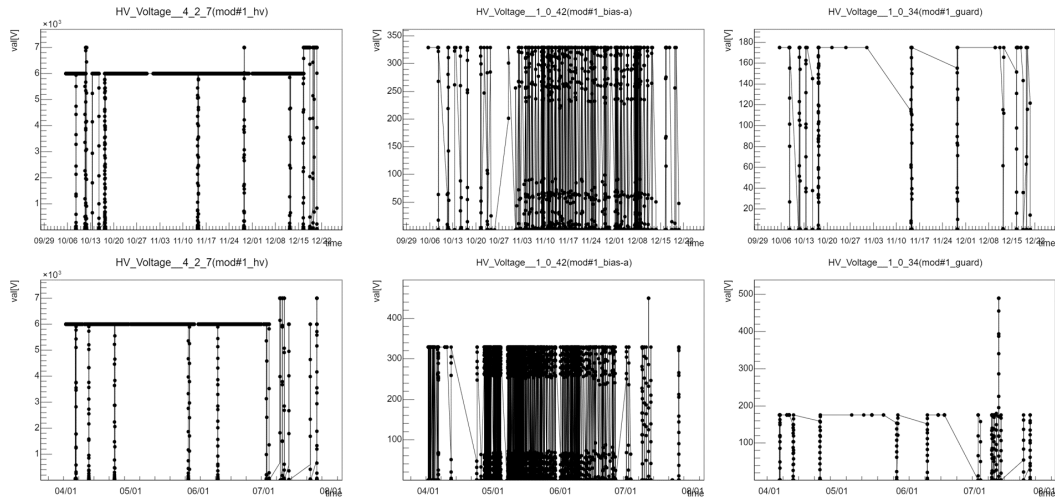


図 5.4 モジュール番号 1 の HAPD の印加電圧値の時間変動 (左部) 加速用電圧 (中央部) 逆バイアス電圧 (右部) 秋の実験期間での時間変動 (下部) 春の実験期間での時間変動

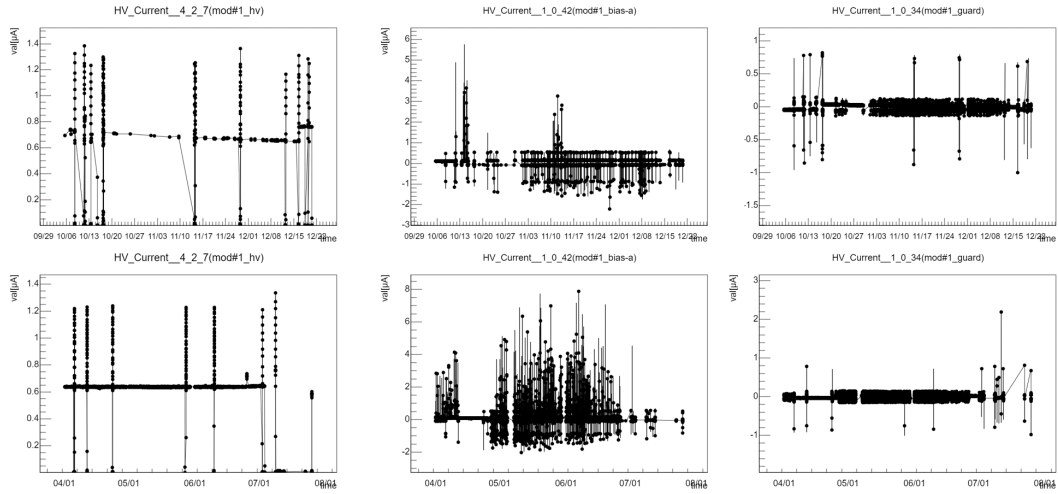


図 5.5 モジュール番号 1 の HAPD の電流値の時間変動 (左部) 加速用電圧 (中央部) 逆バイアス電圧 (右部) ガード電圧 (上部) 秋の実験期間での時間変動 (下部) 春の実験期間での時間変動

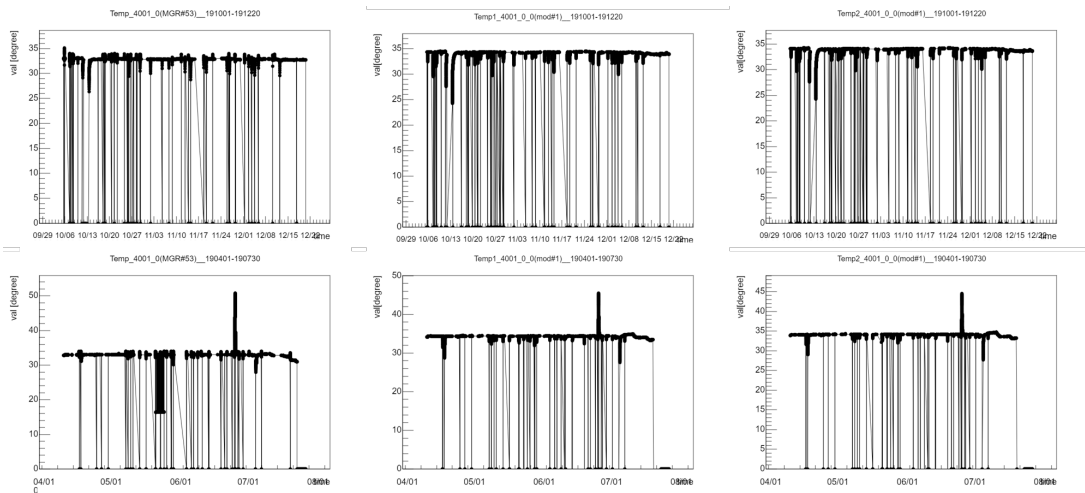


図 5.6 モジュール番号 1 に接続されている読み出し回路の温度の時間変動 (左部)MB の温度 (中央部)FEB の HAPD 側の温度 (右部)FEB の MB 側の温度 (上部) 秋の実験期間での時間変動 (下部) 春の実験期間での時間変動

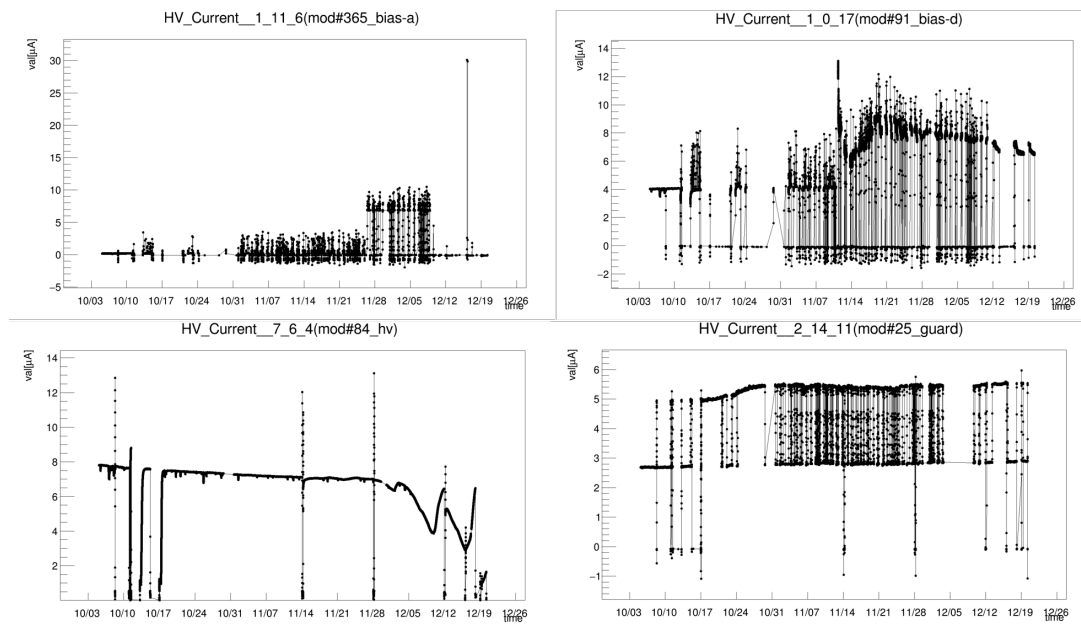


図 5.7 特に電流値の不安定なチャンネル (左上) 11 月 27 日から急上昇 (右上)11 月 8 日から上昇, 21 日をピークに下降傾向 (左下)2019c 期間開始時から下降傾向, なお 2019a 期間では  $6.5\mu\text{A}$  付近で微小な上昇傾向 (右下)10 月 17 日から上昇傾向

### 5.3.2 モニター値データ解析

2019c 期間 (10 月 1 日 ~12 月 20 日) のモニター値データを解析することで, 異常検知率を算出しシステムの評価を行った.

HV の電流モニター値について, 各チャンネルごとにモニター値の平均値を算出し, 他のチャンネルと比較して高い平均値を持つチャンネルを抽出した. “高い”の定義については各 type ごとにモニター値分布を作成し, ピークを超える閾値を設定した (図 5.8). このようにして抽出したチャンネルの一覧が図 5.9 である. 抽出された高い平均値を持つチャンネルは 75 チャンネルあり, その内 21 チャンネル (=28%) は異常検知システムが異常と判定をした. また基準の 2 倍以上大きい平均値を持つ 26 チャンネルにおいては 16 チャンネル (= 62%) がシステムによって検出された. 残りのシステムによる検知が行われなかったチャンネルに関しては, 普段は無効化がなされており, HV テストの (異常検知システムが動いていない) タイミングでのモニター値を使用していると考えられるが, これらについても検知できるようにシステムの改良が必要である.

また読み出し回路の温度についても同様に特に高い温度を取るチャンネルがないかを調

べた. 図 5.10 は各 MB, FEB の温度平均値をプロットしたものである. MB, FEB である程度のばらつきはあるものの, 特出して高い温度を取るチャンネルは無く, また最大でも  $40^{\circ}\text{C}$  程度で収まっている. また, 異常検知システムにおいても読み出し回路の温度で異常を検知した MB, FEB はなかった.

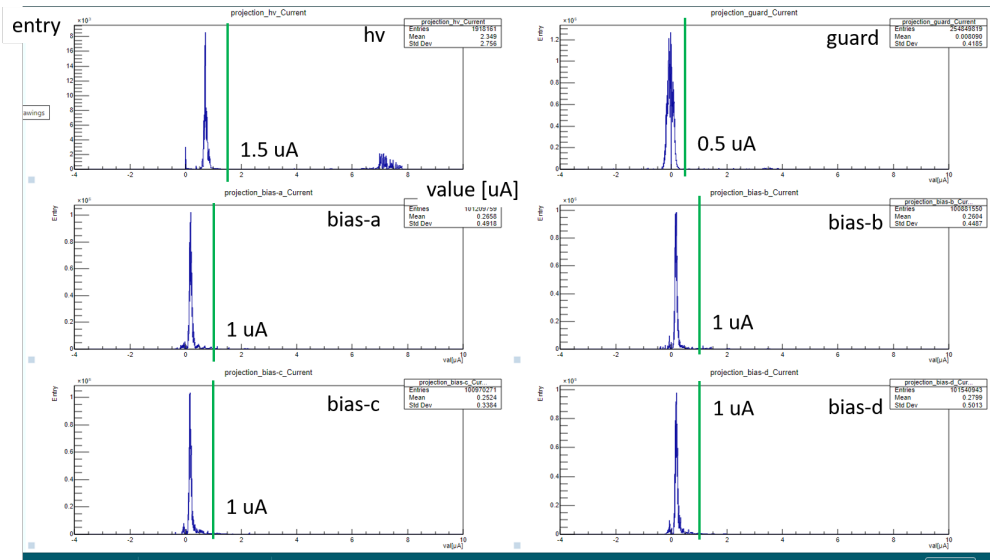


図 5.8 各 type ごとのモニター値分布. 緑の線を超えた値を平均値に持つチャンネルを平均値が高いチャンネルとする.

bias-a	bias-b	bias-c	bias-d	hv	guard
13	2	18	1	84	<b>25</b>
<b>25</b>	44	54	35	158	26
<b>77</b>	83	<b>75</b>	79		77
<b>121</b>	117	83	<b>91</b>		120
139	143	174	93		<b>149</b>
<b>177</b>	211	<b>182</b>	109		<b>244</b>
202	212	205	146		253
237	256	208	211		266
<b>238</b>	<b>258</b>	228	<b>212</b>		272
248	<b>275</b>	<b>249</b>	<b>217</b>		<b>300</b>
253	298	255	224		
332	326	315	275		
<b>365</b>	<b>344</b>	332	<b>276</b>		
	<b>345</b>	342	348		
	368	351	366		
	408	<b>364</b>	395		
		400			
		407			

図 5.9 平均値の高いチャンネル一覧. 数字はモジュール番号であり, 背景がピンクのチャンネルは基準の 2 倍以上の平均値を持ち, 太字は異常検知システムで検知がなされたチャンネル, 下線が異常検知システムでの閾値を個別に設定したチャンネルである.

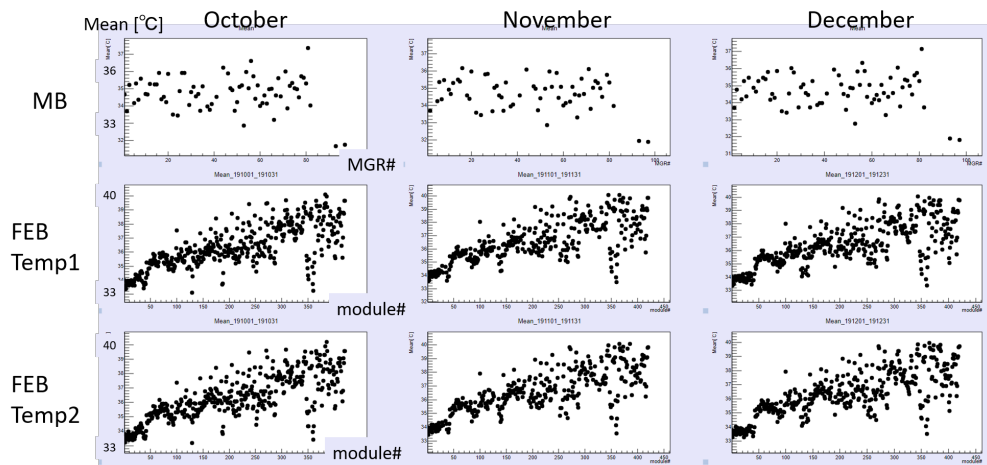


図 5.10 読み出し回路の温度のモニター値分布. 10 月 1 日 ~12 月 20 日のモニター値データを使用し, 各月ごとに平均値を算出した.

## 第 6 章

# 結論

Belle II 実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われている SuperKEKB 加速器による電子, 陽電子の非対称エネルギー衝突実験である. Belle II 測定器は衝突によって生成された  $B$  中間子を精密観測する測定器であり, その中で  $B$  中間子の崩壊の中でも新物理の関与が期待されている崩壊モードに多く含まれる荷電  $K/\pi$  中間子の識別を測定器エンドキャップ部で行っている ARICH 検出器を開発・運用している.

本研究で開発した ARICH 検出器に対する異常検知システムでは, ARICH 検出器の異常を検知しシフターに対して異常への対応を促す情報提供を実現した. 2019 年春の実験期間では ARICH 検出器の設定が頻繁に変更され, 閾値の設定が ARICH の状態の変化に追従できずアラートは閾値を超えたモニター値を検出したが, それらは異常ではなかった. 2019 年秋の実験期間では監視データのカテゴリごとに統一した条件を設定することで誤検知を削減することができた. また, 本システムの運用の中で 11 月 12 日に HAPD 用印加電圧のうちの加速用電圧 1 チャンネルにおける重大な異常を 1 件検知することができ, シフターに対応を促すことができた.

蓄積したデータを利用して各チャンネルの時間変動を見ることのできるウェブインターフェースを開発した. これにより長期的な変動の確認などができるヒストリーをわかりやすく閲覧することができ, またこのようなデータを KEK 外にいるエキスパートも閲覧することができるようになった.

Belle II 実験は本格的な運転が開始されてから 1 年が経過し, ARICH 検出器のモニター値に関する情報も蓄積されてきている. 蓄積されたデータ適切なリファレンスデータの作成を行いより精度の高いシステムの開発が可能となると考えられる.



# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方のご指導とご協力をいただきました。首都大学東京では角野秀一教授、住吉孝行教授、汲田哲郎助教をはじめ、研究室の皆様には大変お世話になりました。特に指導教員である角野秀一教授には Belle II 実験という世界有数の国際実験に参加する機会を頂けましたこと、深謝申し上げます。住吉孝行先生、汲田哲郎助教には素粒子実験に関して様々なことをご教授いただき、また、研究へのご意見や論文の添削などをして頂きました。感謝申し上げます。千葉雅美客員助教、浜津良輔客員准教授にも様々な面でご指導頂きました。

また、本研究についてお声を掛けて頂き、研究の進め方をはじめとして様々なご指導を頂きました北里大学の今野智之助教には大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

同研究室の先輩である米永匡伸さんには研究についてだけでなく、実験に関する申請など、様々な面から助言や手助けを頂きました。ありがとうございます。同期である粟田口唯人君、久世 健太郎君、堀 悠平君とはお互いに切磋琢磨し、充実した研究生生活を送らせていただきました。また後輩である在原君、鶴藤君、三宅君にも楽しい学生生活を送らせて頂きました。皆様に感謝します。

ARICH グループの共同研究者の方々にも大変お世話になりました。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の西田昌平准教授、足立一郎准教授には研究に関する助言を頂いたり、現場での作業でご指導頂きましたこと感謝申し上げます。Jožef Stefan Institute の Samo Korpar さん、Rok Pestotnik さんにも進捗報告の際には様々な助言をしていただきました。ありがとうございます。また、西村美紀さん、総研大の金道玄樹さん、新潟大学の小川和也さん、東邦大学の北村勇人君、東京大学の古井君には研究を進める上で大変お世話になりました。

最後になりますが、経済面・精神面で支えて頂いた両親に感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] KEK, 標準理論を超えるためには, <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2012/08/31/1800/> (参照日:2019-10-30).
- [2] Lüders, G. “roof of the TCP theorem”, *Ann. Phys.* 2, 1–15 (1957).
- [3] Sakharov, A.D. “Violation of CP Invariance C Asymmetry and Baryon Asymmetry of Universe”. *JETP Letters* , 5, 24-27, (1967).
- [4] J. H. Christenson; J. W. Cronin; V. L. Fitch; R. Turlay, *Phys. Rev. Lett.* 13, 138, (1964).
- [5] M. Kobayashi; T. Maskawa, *Progress of Theoretical Physics* 49 (2), 652, (1973).
- [6] Aubert, Bernard et al., BaBar Collaborations, “ The BaBar detector”, *Nucl.Instrum.Meth.* A479 (2002).
- [7] A. J. Bevan et al., BaBar and Belle collaborations., “The Physics of the B Factories”, arXiv:1406.6311 [hep-ex] (2014).
- [8] 海野祐士, 中尾幹彦, 西田昌平, “ $B$  の稀崩壊”, *高エネルギーニュース*, 30-3, 175 (2011).
- [9] H.Y. Cheng, C.-K Chua, “Revisiting Charmless Hadronic  $B_{u,d}$  Decays in QCD Factorization”, hep-ph/0909.5229 (2009).
- [10] S.W. Lin et al. (Belle Collaboration), “Measurements of Branching Fractions for  $B \rightarrow K\pi$  and  $B \rightarrow \pi\pi$  Decays”, *Phys. Rev.Lett.* 99, 121601 (2007).
- [11] S.W. Lin et al. (Belle Collaboration), “Observation of B Decays to Two Kaons”, *Phys. Rev.Lett.* 98, 181804 (2007).
- [12] Y. Chao et al. (Belle Collaboration), “Observation of  $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$  ” , *Phys. Rev. Lett.* 94, 181803 (2005).
- [13] Y. Nakahama et al. (Belle Collaboration), “Measurement of Time-Dependent CP-Violating Parameters in  $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$  Decays”, *Phys. Rev. Lett.* 100, 121601

- (2008).
- [14] M. Fujikawa et al. (Belle Collaboration), “Measurement of CP asymmetries in  $B^0 \rightarrow K^0 \pi^0$  decays”, Phys. Rev. D 81,011101(R) (2010).
  - [15] Yuan CHAO, “New Physics Effects in B Decays”, arXiv:0810.4817 [hep-ex] (2008).
  - [16] Z.Dolezal, S.Uno et al., Belle II collaborations., “Belle II Technical Design Report”, arXiv:1011.0352 [hep-ex] (2010).
  - [17] Y. Ohnishi et al., “Accelerator design at SuperKEKB”, PTEP, 2013, 03A011 (2013).
  - [18] A. W. Chao, M. Tigner, “Handbook of Accelerator Physics and Engineering”, World Scientific Press (1998).
  - [19] E.Kou et al., Belle II collaborations., ”The Belle II Physics Book”, arXiv:1808.10567[hep-ex] (2019).
  - [20] T.V.Dong, S.Uno, M.Uchida, H.Ozaki, N.TAaniguchi, E.Nakao, K.Trabelsi, “Calibration and alignment of the Belle II central drift chamber”, Nucl. Instr. Meth. A 930, 132 (2019).
  - [21] M.Tabata et al., “Silica aerogel radiator for use in the A-RICH system utilized in the Belle II experiment”, Nucl. Instr. Meth. A 766, 212 (2014).
  - [22] S.Iwata et al., “Particle identification performance of the prototype Aerogel RICH counter for the Belle II experiment”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016(3), 033H01(2016).
  - [23] M.Yonenga et al., “Performance evaluation of the HAPD in the Belle II Aerogel RICH counter”, JPS Conf. Proc. 27, 012016 (2019).
  - [24] R.Pestotnik et al., “Front-end electronics of the Belle II aerogel ring imaging detector”, Nucl. Instr. Meth. A 161711 (2018).
  - [25] 米永匡伸, “Belle II 実験 Aerogel RICH 検出器のための光検出器制御システムの開発”, 首都大学東京理学研究科 2016 年度修士学位論文 (2017).
  - [26] CERN, ROOT, <https://root.cern.ch/> (参照日:2019-12-26).
  - [27] CERN, JSROOT, <https://root.cern.ch/js/> (参照日:2019-12-26).