

## ■ 研究紹介

# Belle II ランコーディネーター回想録

KEK 素粒子原子核研究所

足立 一郎

[ichiro.adachi@kek.jp](mailto:ichiro.adachi@kek.jp)

2020 年 (令和二年) 5 月 6 日

## 1 はじまり

この報告は、私が Belle II 実験のランコーディネーターを務めた 2018 年 4 月からの 2 年間について印象に残っていることを記録したものである。この間には、Phase2 での Belle II 実験のコミッショニングと初衝突事象観測、さらに Phase3 運転への移行という多くのことがあった。この慌ただしい時期に実験の現場ではどうだったのか、私の視点から書いてみた。読んでいただければ幸いである。

はじまりは 2017 年 12 月だったと思う。私の PHS の電話が鳴り、相手は後田さんで「居室に来て欲しい」と。さっそく伺うと、宇野さんも同席しており、何事かと。「次のランコーディネーター (RC) を 4 月からやって欲しい」その場では「はい」とも「いいえ」とも言った記憶がないが、これが大変なはじまりであったことは今にしてわかる。

Belle II 実験にはランコーディネーターという役割がある。ひとことで言えば「Belle II 実験のデータ収集を円滑に行なうことができるよう加速器グループを含む関係者と協力し、努力せよ」というところか。問題は「努力すべきところ」があまりにも多くあることであるが、それが判明したのは当然引き受けた後である。Belle II グループが決めた目標積分ルミノシティがあるが、この目標を達成するため現場レベルで、日々のランプランを考え、どのように進めるか決断するというのも大きな仕事のひとつである。これに関連して、いつ Off Resonance データをどれくらい取るか決める。さらにリクエストがあればバックグラウンドスタディをいつ行うか、必要に応じて加速器の方と交渉しなければならない。RC は加速器と実験サイドの間に立つ現場監督みたいな存在と言えるかもしれない。

ここで Belle II 実験のシフト体制について書いておきたい。実験シフトとして 2 名が筑波実験棟地下 3 階の Belle II 制御室でデータ収集に関する仕事を行う。これに加えて BCG (Belle II Commissioning Group) シフ

トという役目がある。このシフトは加速器コントロール棟制御室に詰め、加速器側とのリエゾン的な役割を担う。これは Belle 実験の頃から存在し、Belle II でも引き継いだ形である。衝突実験中にバックグラウンドの状態をいつも監視し、高くなったら加速器のシフトの方に伝え、改善をお願いする。

Belle II 実験から新しい役割として、副 (Deputy) ランコーディネーター (DRC) が設置された。RC をいろいろな点で補佐する役目である。RC は加速器の方々とのコミュニケーションを考慮されて日本語を話す人という条件が課されている一方で DRC はその制約がなく、今まででは海外のコラボレーターがその役についている。よって実験の最前線では、RC はこれら DRC、合計 3 名からなるシフトとさらに各検出器のエクスパートたちと協力してデータ収集を行うということになる。

Belle II グループは実験のコミッショニングは三段階で行なう計画をとっており、最初の段階が Phase1 と呼ばれている期間で 2016 年に実施された。この時は Belle II 検出器は衝突点の外で建設中であった。その代わりに「BEAST2」と呼ばれるコミッショニング測定器が衝突点周りに設置された。加速器としては、最終収束 (QCS) マグネットはまだ設置されておらず、ビームは衝突せずに、加速器のハードウェア、ソフトウェアの性能確認、各機器の真空焼き、コミッショニング測定器によるバックグラウンド測定などが主な目的であった。

2017 年 12 月の時点では、Phase2 と呼ばれる第二段階開始に向けての作業が行われていた。加速器としては、QCS マグネットが設置され衝突を行なう状態が整っていた。Phase2 ではシリコン検出器 (SVD) とピクセル検出器 (PXD) はインストールせず、衝突点周辺のバックグラウンドを測定するコミッショニング測定器が設置された。Phase2 の目的は、SuperKEKB 加速器で初めて導入された nano ビームという新しい方法でルミノシティが出るのか、目標ルミノシティは  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  とされ、さらにこの値が向上する道筋があること、また、バックグラウンドは SVD および PXD を設置しても問題ない

レベルかを確認することである（このルミノシティの目標がいかにたいへんなことか後で知ることになる）。これらの条件が満たされれば、SVD と PXD を据付けて Phase3 という本格運転を開始する計画である。

## 2 Phase2 運転

### 2.1 初衝突観測まで

私の前の RC は宇野さんであった。宇野さんと言えば、Belle 実験で RC をおそらく 10 年近く引き受けているという伝説のような驚異的人物である。引き受けた当初は、Phase2 運転は 2018 年 2 月から始まる予定であった。2 月ならば、まだ宇野さんが RC である。宇野さんのやり方を見ておいて、4 月からは、それをそのまま引き継げば良いかと楽天的に考えていた。ところが、2 月になり衝突点の真空チャンバーと QCS ビームパイプの接続部付近で水漏れが発生するという問題が起こった。この対処のために加速器の立ち上げが遅れて、3 月 19 日から HER (電子ビーム) 入射調整開始となった。3 月 26 日からは LER (陽電子ビーム) 入射調整で、ビーム衝突なしのまま、宇野さんの後を引き継ぐことになった。これには多少焦り、自分の不幸を呪った。自分の甘さを痛感したが、幸いにも、2 月から Belle II 測定器のコミッショニングは開始されており、宇宙線データを収集していて、この時に宇野さんのやり方を少しでも学べたのは良かった。

さて、両リングにビームが蓄積できれば、Belle II としてやることは、まずはバックグラウンドスタディである。ここで正直に書いておくが、私自身、最初からバックグラウンドに多くの興味があったわけではない。その証拠に、Phase1 運転の時、バックグラウンドスタディに参加していないどころか、加速器コントロール棟に一度も出入りしていなかった（と、いばる話でもないけど）。RC だと、そもそもいかない。むしろ、自分から加速器の状況とバックグラウンドの様子をみて、スタディすべきかどうか決めないといけない。過去のグループミーティングのバックグラウンドセッションのスライドをひそかに見返して、理解しようとしたのは言うまでもない。それに加え、バックグラウンドだけではなく、加速器自体を知らないといけない。OHO セミナーのテキスト [1] を使って、大昔に勉強したことをもう一度おさらいしていたのもこの頃である。Belle II の中には、中山さんを中心とした優秀なバックグラウンドグループがあり、とても心強かったことは記しておきたい。

両リングにビームが回れば、初衝突をめざすことになる。Belle II 測定器で初めて観測する衝突事象である。その日 4 月 25 日夜の早い時間にはビームビーム効果が観

測されており、衝突できそうな状態であった。私自身は加速器コントロール棟において、DRC のカルロス (Carlos Marinas) は筑波実験棟にて、Belle II 側の現場をまとめてもらつた。加速器側が衝突準備完了となつたら、こちらの出番である。HER 40 mA, LER 60 mA から始めるにした。これはバックグラウンドスタディから中央飛跡検出器 (CDC) の高電圧 (HV) がトリップすることなく安全に運転できると思われる電流である。ルミノシティとしては  $10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度を予想していた。まったく低い値であるが、30 分程度待てばハドロン事象が観測できるはずである。各検出器に HV を上げてもらい、トリガー調整である。じつは、私が心配していたことがこのトリガーである。

トリガーを調整するには少なくとも CDC と電磁カロリメーター (ECL) がオンされ、かつグローバルデータ収集システム (DAQ) の制御下に入っていないといけない。しかし、加速器スタディ中は CDC の HV はスタンバイで、あげることができない。加速器運転前に、宇宙線で十分試験できればよかったのだが、残念ながらその時間はなく、ここまで来てしまったからである。その意味でトリガーグループの方には大きなプレッシャーを与えてしまった。「ごめん、申し訳ない。」しかし、もはやビーム衝突である。いきなり本番でトリガーを動かすしかない。条件を確認、変更しながら、Belle II の何人かからいろいろ文句？と言われつつ、トリガーグループもがんばった。待つこと数時間、日付がかわった 26 日午前 0 時 36 分、めでたく最初の衝突事象を観測。その時の写真が図 1 である。その夜は朝まで物理ランをやることができ、しかも徐々に電流を上げていくことができた。「やれやれ」と同時に、プロジェクトとして衝突実験という新たなステージに進むこととなった。

### 2.2 ランミーティング

ビーム運転が始まると、加速器では KCG (KEKB Commissioning Group) ミーティングが週末も含め毎朝 9 時から開催される。ここでは、前日の各シフトをとった方が、シフト中に行ったことやトラブルなど報告し、その日の運転予定を決めるという打ち合わせである。当然、RC はこの打ち合わせに出席し、必要があれば Belle II の状況について報告し、運転などに関して要求があればこの場所で伝える。この後、Belle II 側では 10 時よりランミーティングを行っている。ここでは、すべての検出器について各エクスパートが少なくとも一名は参加してもらう。RC から加速器の状況を説明し、エクスパートより各検出器のステータスを報告してもらう。問題があれば、必要な処置などについて話し合い、加速器の予定を知った上で Belle II の当日の予定を決める。

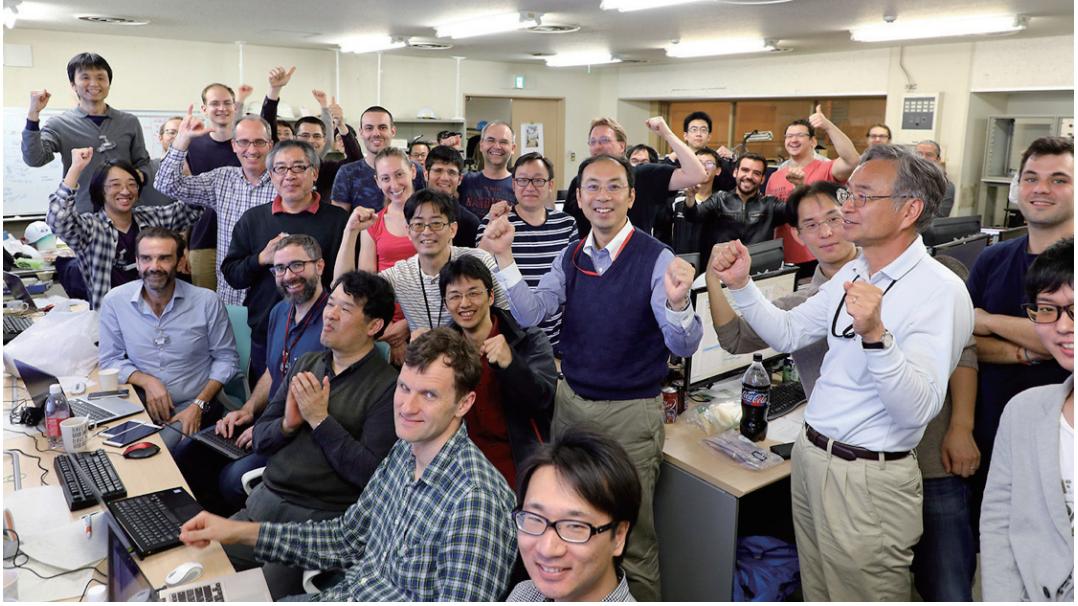


図 1: 初衝突観測時の筑波実験棟制御室の様子

RC はこの打ち合わせのチアをして、プランを決めることが仕事である。私が RC をしていた期間で、もっとも大きな失敗が、Phase2 運転期間のランミーティングについてである。

Phase2 運転の目的は前述したとおりで、当然マシンスタディが中心となった。加速器のコミッショニンググループの人数も限られているため、 $\beta_y^*$ （衝突点のバティカル方向の  $\beta$  関数）を絞りルミノシティを向上する努力などは、平日の昼シフトと準夜シフトで行い、深夜シフトと週末は物理ランをやることになった。これは人的資源を考えれば合理的かつ効率的で、Belle II 側もデータを貯めることができるので、嬉しいわけである。初衝突の後は、このモードに入り、データもだんだんとたまっていたのだが、問題はランミーティングである。

ランミーティングは、今でこそ週末を含む毎日行っているが、Phase2 運転時の最初は、深夜および週末は主に真空焼きが行われており、Belle II から見れば週末は、我々の DAQ の試験を行うだけで、特に打ち合わせする必要もないという感じであった（これもじつは大きな間違いであるのだが）。そのために週末はランミーティングはなしという体制であった。しかし、ビーム衝突運転がはじまったわけで、しかも週末が物理ランにあてられている。当然週末こそランミーティングをやるべきである。ところが、週末ランミーティングなしを続けてしまったのである。私自身は週末も KEK に来ており、KCG ミーティングにも出席していたのだが、なぜ、やり方を変更できなかったのか？おそらく RC としての自覚と問題意

識が十分でなく、RC としての自信がなかったのかもしれない。これに気づいたのは Phase2 運転が終わってからである。Phase2 運転は Belle II にとって安定に DAQ が走ることができず、とても苦労した時であるが、その一端は私のランミーティングのやり方に関わっていたと今も思っている。

前記したように、マシンスタディは昼と準夜シフトに行われ、物理ランは深夜シフトとなると、BCG シフトから見ると昼・準夜シフトと深夜シフトでは行うことが全く違うことになる。マシンスタディ時は、当然加速器側が中心で、BCG シフトは特に大きな役割を担うことはないが、物理ランとなれば、HV オンの指示やバックグラウンドの監視などデータ収集について大切な役をこなさねばならない。しかも原則 BCG シフトは連続で取らないので、前回の物理ランの状況を把握している人が次の深夜シフトをとるわけではない。となると、ビーム電流やバックグラウンドの情報の受け渡しが困難になる。その役割をするのが必然的に RC となる。したがって、深夜シフトが始まるまで、加速器コントロール棟にいなければならない。午前 0 時から 1 時頃に物理ランが開始されると、昨日のビーム電流から始めて、バックグラウンドを見て可能だったらビーム電流をあげ、できるだけ高いルミノシティで安定運転を確認して、深夜シフトの方に必要な指示をして帰宅という感じである。マシンスタディの関係で、物理ラン開始が午前 2 時、3 時となることもある。夜明けを迎え、明るくなる空をみつ、セカオワの「Dragon Night」を聴きながら帰路への

ハンドルを握ったのは一度や二度ではない。そして午前9時から KCG ミーティングが待っているのである。

### 2.3 コリメーター調整

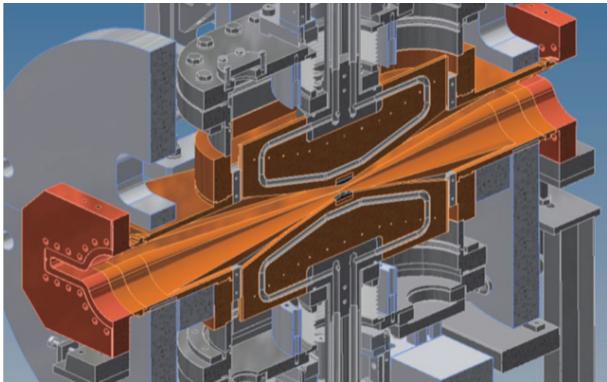


図 2: 可動部が垂直方向であるコリメーター

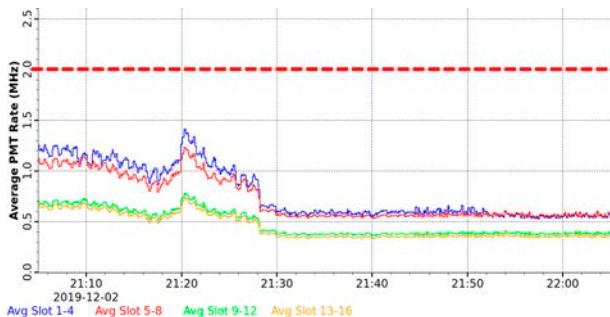


図 3: コリメーター調整によって TOP の PMT のバックグラウンドレートが減少した例

加速器運転の中で、Belle II 側に任せられたもっとも重要なものがコリメーター調整である。コリメーターとは、加速器の真空機器のひとつで、ビームの周辺部など不要な部分を除去し、Belle II へのバックグラウンドを低減させ、QCS をクエンチから守るものである。コリメーターの真空部に可動部分があり、これをビーム軌道に近づけることで、ビームの不要部分を取り除く。SuperKEKB には可動部が水平方向に動くものと垂直方向に動くものが設置されている。例として図 2 は、可動部が垂直方向に動くコリメーターである（加速器石橋氏提供 [1]）。このような装置が HER 水平方向 14 台垂直方向 10 台、LER 水平方向 14 台、垂直方向 6 台（2020 年 4 月現在）設置されている。

今までのバックグラウンドスタディの結果、Belle II で観測される蓄積ビームによる寄与は、LER のビームガス散乱によるものが 7 割程度と分かっていた。LER は KEKB から SuperKEKB にするにあたって真空チャンバーを変更したため、もともとの真空レベルが HER と比べて良くない。しかも、コリメーターを設置した近辺

は真空を破っているため、さらに悪いと考えられる。このような条件で、おそらく LER ビームの周辺部が QCS 内部の真空チャンバーのアパーチャーの狭い場所でビームロスし、その影響が検出器のバックグラウンドなっていると推測された。より高いルミノシティを目指すには高い電流を蓄積する必要があるが、ビームガスの寄与は電流の二乗で増える。このバックグラウンドを減らすのに効果的なのがコリメーターである。一般に可動部をビーム軌道に近づけると、不要なビーム部分はより除去され、バックグラウンドは減少する。しかし、軌道に近づけすぎると、ビーム本体部に影響し、かえって散乱が増える。また、可動部を軌道に近づけ過ぎると、入射が悪くなるなどの影響ができる。したがって、入射に影響がなく、かつバックグラウンドを減らすという調整を行うことが大切となる。これがコリメーター調整である。

Belle/KEKB の時は、コリメーター調整は BCG シフトの仕事の一つであった。また、KEKB 立ち上げ半年後には、コリメーター調整はほぼ安定していたと記憶する。しかし、SuperKEKB では、ビームの  $\beta_y^*$  を絞ると、軌道も変わりバックグラウンドの状態も変化し、コリメーター調整が必要となる。Phase2 運転では、3ヶ月程度の間に  $\beta_y^*$  を detuned から 8 mm, 6 mm, 4 mm と絞っていく予定であった。これにより、1週間程度でビームの状態が変わり、物理ランをするためにはそのたびにコリメーターの調整が必要となる。どのコリメーターを動かすと、バックグラウンドにどのような効果があるかは、経験を積めばわかってくる。このようなノウハウをすべての BCG シフトと共有し、操作できるようにすることは、現実的には難しい。しかも、BCG シフトは KEKB の時は、ほぼ KEK スタッフのみであったが、いまやそのような縛りはなく、海外の研究者もシフトを取ることになっていた。どの BCG シフトもコリメーター調整できることが望ましいが、実際は困難である。RC としては、人に頼むよりは、自分で操作し、そこからコリメーターとバックグラウンドの関係などを学びたいということで、最初は自分でほとんど行っていた。ただ、今後のことを考えると、「これでは心許ないなあ。」と思っていた時、2018 年 5 月くらいから田中さんがコリメーター調整に興味をもってくれた。ご本人の努力と才能で、今ではコリメーター調整の第一人者である。田中さんの大活躍で、私も本当に助けられた。

コリメーター調整によるバックグラウンド低減の例を図 3 に示す。これは TOP (Time of Propagation) カウンターのいくつかの PMT の平均ヒットレートの時間経過をプロットしたものである。21 時 7 分から 29 分頃までコリメーターを調整しており、可動部をビーム軌道に近づけたり（レートが下がる）遠ざけたり（レートが上がる）していた。最終的には 28 分にコリメーターの位

置をもっとも軌道に近づけてヒットレートが急に減少している。

この作業は、これからも長く続くと考えられる。そうすると、これからはコリメーター調整の専門家を増やすことが大切になるかもしれない。長い目で見れば、加速器運転も徐々に安定かつ安全になってゆき、調整のやり方もほぼ決まってきて、BCG シフト全員ができるようになるとも思う。

## 2.4 Phase2 運転の結論と反省

6月の Belle II 全体会議にて Phase2 運転状況について話し合いが行われた。加速器グループからは、 $\beta_y^*$  を絞っていくことでルミノシティが徐々に向上しており、 $\beta_y^* = 4\text{mm}$  で  $1.9 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を達成したこと、一時的ではある  $\beta_y^* = 2\text{mm}$  まで絞れたこと、さらに今後の調整によってルミノシティの向上する見込みがあることが示された。また、Belle II のバックグラウンドグループからは、今までの運転で観測されたバックグラウンドは予測と比べて高いものの、検出器の健全性に影響を与えるレベルではないとの結論が伝えられた。これらの情報をもとに議論がなされ、2018年の夏のシャットダウンに PXD と SVD を衝突点に据付ける、すなわち、すべての検出器群を組み入れ、本格運転、つまり Phase3 へすすむことが決定された [2]。

7月1日午前8時過ぎ、加速器コントロール棟では多くの歓声が上がっていた。午前9時に夏のシャットダウンのため加速器運転終了となる直前である。いわゆる加速器のハードウェアの故障覚悟の「突撃モード」で、ビーム電流を上げ、ルミノシティの上昇を見ての声であった。もちろん Belle II の検出器は壊すわけにはいかず、HV はバックグラウンドが高くて印加できない。その状態でルミノシティ出して歓声？その気持ちは理解できるが自分としての心情は複雑。直感的に「この方向に我々の未来はないだろう」と感じた（冷静に考えれば、これは正しくない。しかし、そう感じたことは確かなのでそのまま記しておく）。Belle II の HV をオンして、高いルミノシティを上げ、歓声を上げるための努力がさらに必要なんだなあと思い、だれよりも早く、活気づく制御室に背をむけ、9時からの KCG ミーティングのため会議室にひとり寂しく向かったのである。

Phase2 運転を経験して RC としての反省は、(1) 前述したランミーティングを毎日開催しなかったこと。今後は毎日ミーティングを行い、必要があれば休日でも人を集めることにした。(2) 私自身がもっと筑波実験棟の制御室にいるべきであった。Phase2 はマシンスタディが中心なので長い時間、加速器コントロール棟にいるというの、マシンや運転の状況を把握するために

必要で当然と思うが、かといって筑波実験棟制御室に行かなくても良いというわけではない。実験シフトがいて DAQ の試験を行っているわけで、シフトとコミュニケーションを取り、何が問題なのかなど直接情報をもらうことも大切なはずである。そもそも、Belle II の RC なのに、加速器ばかりに居るのはおかしくないか？自分の本籍はあくまで Belle II のだし。もっと DRC と調整すれば良かったかもしれない。とりあえず、Phase3 運転が開始されたら、筑波実験棟で実験シフトの様子をもっと見るということを心がけることにした。その後、帰宅する前には必ず筑波実験棟制御室に顔を出すことが日課となった。

## 3 Phase3 開始：2019年春の運転

### 3.1 ドレス・リハーサル

2018年10月の全体会議の主な話題は Phase3 運転に向けた準備状況の確認であった。その中で、Phase2 時での DAQ が不安定であったことが大きな問題の一つで、いかに安定化させるかが積分ルミノシティを効率良く蓄積する鍵となるという認識であった。この議論から、2019年のビーム運転の始まる2ヶ月前から「ドレス・リハーサル」として24時間体制のシフトを開始し、DAQ についてストレステストを行なうという案が採用されることになった。「ドレス・リハーサル」、つまり本番の衣装を着て仕上げの舞台稽古のごとく、ビームはないが、それと同様な DAQ 試験をやろうと言うのである。確かに良いアイデアで、DAQ の安定化に役に立つと思ったが、第一印象は「ビーム運転の始まる2ヶ月前から始めるの？マジ？」である。言うのはたやすいが、コーディネートする立場からすると「そんなにモティベーションが保てるのか？」「そもそもシフトが埋まるのだろうか、ビームもないのに？」と思ってしまったのである。

とは言え、決まってしまったものはやるしかない。まずはドレス・リハーサルの開始日を2019年1月15日とした。ビーム開始3月11日までにやることを決めないといけない。プライオリティの順に並べると(1) 今期のシャットダウンで新しく据え付けた PXD と SVD が安定に読み出せること、(2) その他の検出器も含めて高いトリガーレートで安定に DAQ が回せること、(3) 補正やアライメントのために磁場なしの宇宙線ランの実施、である。(1)と(2)に関しては、あくまで「リハーサル」なので、プログラムなどにバグがあって走れないわかれれば好都合、この機会に修正してもらうという態度である。ランミーティングも休日も含め毎日実施し、問題があった場合、修正の進捗は報告してもらうこととした。こうすることで、問題が他の検出器グループと共に

有でき、かつ適度なプレッシャーの中でデバッグが進むのではないかと思ったからである。

最初の 1-2 週間はシフトが空のままで、どうなるかと思ったが、やがてシフトスロットはほぼ埋まった。さらに、検出器のエクスパートの方の意識が非常に高く、モティベーションを持って取り組んでもらったことがすごく良かった。各検出器のファームウェアのバグ出しをしつつ、ランダムトリガーで 1kHz からはじめ 10kHz, 20kHz とあげて DAQ システム全体の安定性をチェックしていった。実際の衝突実験では Phase2 の経験からトリガーレートは 10kHz を上回ることはないと予想できていた。ランダムトリガーだとレートは上げることができても、イベントのデータサイズとしては検出器のノイズのみで小さい。DAQ としてはデータサイズが大きい場合に問題が発生するという可能性もある。この試験のため、各検出器の読み出し回路の閾値を下げてもらうなど工夫をして、イベントのオキュパンシーを上げて、さらにトリガーレートを上げるというストレス試験を行った。また、オンラインからオフラインへ raw data をコピーしているのだが、このステップまで含めてテストを行うことを続けた。「ストレステストは自分自身へのストレスになるよなあ。」とぼやいていたが、あっという間に 2ヶ月が過ぎた。DAQ のエクスパート、各検出器のエクスパート、それにオフラインのコンピューティングの方々がプロフェッショナルな仕事をしてくれたと思う。

自分で良かったことは、ドレス・リハーサルの期間にビームはないわけで、好きなだけ筑波実験棟にいることができたことである。

3月1日にはソレノイドを励磁し、磁場ありの宇宙線データも取得し、3月11日にいよいよビーム運転開始を迎えた。

## 3.2 加速器のトラブルで

Belle II グループから加速器グループを見る時、時々「文化の違い」を感じる。これがもっとも顕著にでるのが加速器でハードウェアのトラブルが起こった時ではないかと思う。

Phase3 の開始時にダンピングリングから LINAC への出射セプタム電磁石の電源に不具合が発生し、LER の立ち上げが一週間ほど遅れるということがあった。Belle II だと、ある検出器に問題が発生すれば、自分の担当に関係なく「なぜ xxx しなかった?」「どうして xxx しないのか?」と首を突っ込み、意見をだし、やがて良い方向に収束していくという感覚なのだが、加速器ではそうはならない（と少なくとも私の目には映った）。

加速器のミーティングで担当者からトラブルの報告があり、当然いろいろな質問、つっこみがあり、トラブル

解消にむけたスケジュールなど意見ができるものと思っていたが、加速器では、私のいたミーティングでは、そうはならないのである。みなさん、「おとなしい」のである。「静か」なのである。主幹の方々からも厳しい話はでないでのある。「おいおい、自分は Belle II から出ている立場だぞ、このままじゃマズイだろ！」トラブルは起きてしまったものは仕方がないが、いかに早く原因を突き止め、解決するかがもっと大切である。「なぜすぐに業者を呼ばないので」「業者がすぐ来ないなら、さらに努力すべく上の立場の人から要請してはどうか」「進捗状況を毎日 Belle II 側にも共有して欲しい」などなど、さらに主幹の方に指示まがいな意見を述べたこともある。こういうことは不得意なのだが、Belle II の RC として言うべきことは言わないといけない。本当に嫌で疲れる仕事である。

おそらく加速器は非常に高度な専門家グループの集団という側面があり、別のグループへの心理的垣根が少しあり、口出しを遠慮するような傾向があるのかもしれない。あの時の私の発言はすべて RC としての立場から出したもので、自身の性格から出たものではない（と思う）。気分を悪くされた主幹の方もいてもおかしくない。心の広い方々で良かった。

## 3.3 Phase3 実験開始

いよいよ Phase3 の開始である。2019 年 3 月から 7 月 1 日までの期間のプランとして、加速器グループからは  $\beta_y^*$  を 3 ヶ月に 3 mm まで絞り、4 月以降はその条件で物理ランを行うという計画が示された。一定の  $\beta_y^*$  で安定に運転し、積分ルミノシティを稼ごうという方針である。その目標として  $10 \text{ fb}^{-1}$  という値が掲げられた。Phase2 の時  $\beta_y^* = 4 \text{ mm}$  で達成した  $1.9 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  から、 $\beta_y^*$  を絞り、長期間安定運転を行うことでなんとか達成できる数字である。努力するにはとても良い値に思えた。Phase2 では積分ルミノシティは  $0.5 \text{ fb}^{-1}$  だったのでその 1 年後に 20 倍のデータ量を蓄積できれば、内外に好印象を与えることができるだろう。

また、SuperKEKB 加速器としては初めてエネルギーを変更し、Off Resonance データ収集も行うことが計画された。

3月11日に予定通り HER 入射、先述したダンピングリングの問題で LER は少し遅れて 13 日に入射が開始された。立ち上げはほぼ順調に進み、 $\beta_y^*$  はまずは 8 mm で各種の調整をし、電流を上げ、真空焼きを始めた。そして迎えた 25 日の夜、衝突実験である。HER150 mA, LER 200 mA でトリガー調整の後、いよいよデータ収集開始。待つこと 30 分くらいであろうか、無事に衝突事象を確認できた。このときの記念写真が図 4 である。



図 4: Phase3 で初衝突を観測。その時の筑波実験棟制御室での記念写真

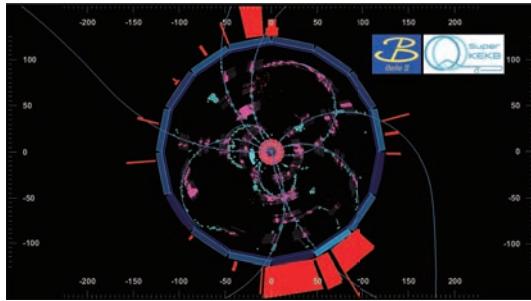


図 5: Phase3 初衝突で観測したイベント

PXD と SVD が入った Belle II 測定器での初ハドロン事象を図 5 に示す。

ここまで順調で、その後マシン調整をすすめ、 $\beta_y^*$  を 6 mm, 4 mm, 3 mm と絞り、コリメーター調整をして、いよいよ物理ランを始めようとしていた 4 月 3 日午後 9 時頃、火災報知器が発報。LINAC 加速管組立室で火災発生である。

この火災のために 3 週間ほどビーム実験はできなくなってしまったが、Belle II としてこの時間を大切に使うべく、アライメント用のソレノイド磁場ありおよび磁場なしの宇宙線データ収集ランの実施と「ドレス・リハーサル」と同様の DAQ のストレステストなどを行った。

LINAC の方をはじめ多くの方々の努力で、幸いにも連休前の 4 月 25 日深夜には物理ランが再開できた。この LINAC の復旧作業時に、Belle II にいるポスドクの何人かが私のところに来てくれ「手が必要だったら言って欲しい。なんでも手伝う。」と言ってくれたことは本当に嬉しかった。

この年の連休はプラチナウィークと呼ばれ 10 連休となっていた。我々としては、毎日淡々と物理ランを行う日々であった。この間には HER, LER とも 100 mA 程度から始め、350 mA まで徐々に電流を上げ、ルミノシティも  $1.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  から  $3.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  まで向上した。

この事故のため当初の  $10 \text{ fb}^{-1}$  を蓄積するプランは吹っ飛んでしまった。これからのランプランを立てないといけない。連休明けの時点でマシンスタディなどを除くと我々がデータ収集できるのは 3.5 週間ほどである。今さら楽観的な見通しを立てるより、実績に基づいた予想を立ててそれを上回れば良しという考え方で計画を作る事にした。今までの平均的な実績にビーム電流を 2 倍、連続入射（後述）を行えば 1 日  $100 \text{ pb}^{-1}$  は達成できるはず。調整が進めばルミノシティを改善するだろうと多少期待をいれて、積分ルミノシティ  $3 \text{ fb}^{-1}$  という数字を挙げた。これはダークフォトン探索の解析で論文が出来る最低ラインのデータ量とちょうど対応していたと思う。

### 3.4 連続入射運転開始

いよいよ連続入射の導入である。ここで言う「連続入射」とは、入射しながらデータ収集を行うことである。電流が減少する分を入射ビームで補うため、高いルミノシティを維持しながらデータがとれるメリットがある。これは積分ルミノシティの観点からは非常に大きな効果がある。この方法は Belle 実験・KEKB 加速器/BaBar 実験・PEP-II 加速器で実現され [3]、積分ルミノシティ向上に大きく寄与したことは広く認識されて

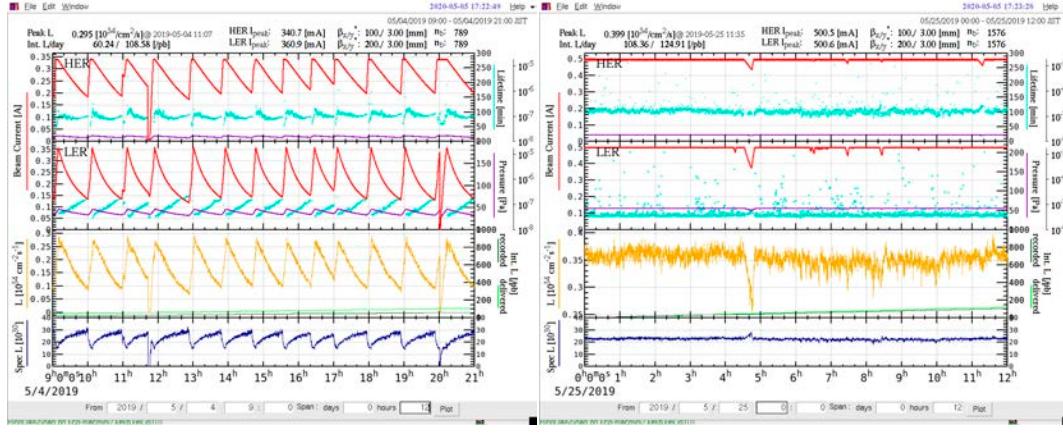


図 6: 通常の入射モードでの運転（左）と連続入射モードでの運転（右）

いた。SuperKEKB プロジェクトでは必須の条件となっていた。マシンの運転側からも、電流値一定で運転ができるため、ルミノシティ調整もやりやすくなる。特に SuperKEKB 加速器の場合、LER の寿命は  $\beta_y^* = 3 \text{ mm}$  で 10 数分程度と短く、連続入射が強く望まれていた。このためには、先に説明したコリメーター調整で入射効率を落とす事なく蓄積ビームからのバックグラウンドの寄与を低減させ、入射ビームのバックグラウンドは問題ないレベルであることが求められる。CDC の HV がトリップするようなノイズが入射で発生すると実現できない。図 6 に通常入射モードと連続入射モードの運転の様子を示す。

実験側では、入射のタイミングから数 msec の間トリガーに veto をかけ、入射ノイズの高いバンチではデータを取らないということを行う。この veto 時間は、dead time となり、できるだけ短く、通常は 5 % 以下が求められる。これは加速器の状態によって、Belle II のデータ収集効率に影響がでることになる。じつはこの秋の運転でわかるのだが、 $\beta_y^*$  をさらにしぼっていくとの影響が大きくなる。ますます入射の状態が我々の運転にとって重要な鍵になっていくのである。

### 3.5 ビームアポートと PXD 問題

Belle II 測定器のビームパイプ周辺にダイアモンドセンサーがいくつか設置されて、独自にビームロスを測定している。もしこのロスがある時間内で閾値以上になっただ場合、安全のためビームをアポートする信号を出し、加速器側に送りビームを正常にダンプする。そうすることで、ビームロスに伴う最悪の事態を避ける安全システムである。

しかしこれが問題となることが発生した。6月9日午後10時過ぎ、HER 620 mA, LER 660 mA という比較的高いビーム電流で衝突実験中に、Belle II のダイアモンドセンサーによるビームアポートが発生した。ビームを

ダンプしたにもかかわらず、QCS のクエンチが発生。調べてみると Belle II 側がアポート信号を出した後、ビームが完全にダンプされるまでの約 40  $\mu\text{sec}$  の間、LER が 150 mA ほどビームをばらまいていたことが判明。ビームは一番狭いアーチャーのところ、つまり衝突点近傍領域で最もロスするはず。これが原因で QCS クエンチが起きたわけである。それだけではなく、ビームロスは PXD にも深刻な影響を与えていた。PXD の 16 あるモジュールの一つが読み出せなくなってしまったのである。おそらくビームロスが読み出しの ASIC に影響を与えたためと推測された。

実は同様のアポートが 5 月にも起こっており、これは 2 回目であった。この時にも PXD の 1 モジュールに悪影響がでていた。これらは、ビームアポートシステムにおいて、信号を受け取ってから実際のビームダンプにかかる時間が最長で約 40  $\mu\text{sec}$  かかることに関係していた。加速器の方からは「これは十分早く、これ以上は光の速度より早くないと時間短縮はできない」と言っていた。愚かな事に、これを信じてしまっていたのである。少なくとも 1 回目の問題が起った時に、もっと問題の原因を掘り下げ、アポート高速化を進めておくべきであった。少なくともバンチパターンにアポートギャップを 2 箇所に入れるなど可能なところから手をつけるべきではなかったか？反省点の一つである。

私の考えでは、検出器の安全を確保するためには、加速器のアポートシステムに依存するのではなく、Belle II 自身で安全システムを構築することが大切である。現在ではダイアモンドセンサーのアポート信号を直接 PXD の読み出し回路に送り、すぐに電源をオフする安全機能を追加している。

QCS クエンチに至るビームロスがなぜ発生したか、原因は不明である。可能性として真空チャンバー内のダストとの相互作用が挙げられていた。真空グループより過去の記録を調べると、この現象は高いビーム電流で発生しやすいということが示された。そこでビーム電流を上

げる時に導入したのが「Baking ラン」である。今までの実績以上のビーム電流に初めて上げる時は、Belle II 測定器の HV はスタンバイにして、最低でも 30 分程度運転 (Baking) し、ビームアボートが起きないなど安定であること確認する。その後、最高ビーム電流から 10 mA 程度低いところを Belle II の運転ビーム電流として HV オンにして実験するということにした。これでより安全に運転できるはずである。

また、加速器側でも 2019 年の夏のシャットダウンには信号ケーブル経路の変更など高速化の努力をしてもらつた。現在の運転ではアボートギャップが二つある 2 トレインのバンチパターンにしてもらつていて。

### 3.6 6 月までの実験のまとめと秋からの運転

この期間に蓄積した積分ルミノシティは  $6.5 \text{ fb}^{-1}$  であった。火災後に立てた目標  $3 \text{ fb}^{-1}$  から考えれば倍の数字だし、もともとの目標値  $10^{-1}$  の 6 割である。とりあえずは「良かった」のではないかと思う。火災からの復帰、その後の加速器の運転など、多くの方に感謝したい。また、今期の最後のマシンスタディで  $\beta_y^*$  を 3 mm から 2 mm に絞って、ルミノシティの向上が見られたことは今後につながる明るいニュースであった。

一方で、Belle II の中では、今後の運転を考えた時、なかなか上がらないルミノシティを憂い、もっとマシンスタディをすべきなのではないか? LER の真空が良くないのなら、真空焼きをもっと進めるべきなのでは?などの意見があった。まだほんの少しの積分ルミノシティをためただけで、ビームロスからハードウェアに不具合ができるのはなんとも納得がいかない人がいても仕方がない。SuperKEKB の調子がもっと上がるまで、Belle II 測定器はオフにしておくべきではないかとの声もどこからか聞こえてきた。

私自身は物理ランをやりつつ、マシンスタディを行い、少しづつ理解を深めていくことがもっとも性能向上につながると考えるのだが。

秋の運転はマシンスタディを中心とし、特に  $\beta_y^*$  をさらに絞ってルミノシティ向上が見込めることがもっとも重要な課題となった。同時にバックグラウンドの理解を進めることも求められた。物理ランという意味では、深夜シフトと休日に行うという Phase2 と同様のスタイルである。

## 4 2019 年秋の運転とその後

### 4.1 Deputy ランコーディネーターとシフトトレーニング

DRC について書いておきたい。この夏から DRC はカルロスからフーリア (Hülya Atmacan) に交代していた。DRC の任期は再任可の 1 年である。

初めて実験シフトを取る時には、事前にシフトトレーニングを受けねばならない。このトレーニングは通常週に二回、水曜日と金曜日に行っている。このトレーニングを主催するのも RC 及び DRC の仕事である。トレーニングでは、各検出器のエクスペートが持ち回りで先生役をやってもらう。この時に使用する実験シフトマニュアルがある。彼女はこのマニュアルの整備を精力的にやってくれた。しかも、持ち回りの先生役によってトレーニングにばらつきがでないように先生用のチェックシートの準備もしてくれた。その他にも BCG シフト用と実験シフト用に物理ランを開始する手順を明瞭にまとめてくれている。これによってシフトの質も改善したと思う。個人的にはこのような documentation は苦手なので、彼女がマニュアル整備などで活躍してくれたのはとても助かった。

Belle II で毎月曜日開催しているミーティングの資料作りと発表なども行ってくれていた。KCG ミーティングのスライドをもとに、時にはグーグル翻訳で日本語を訳してスライドを作っていると思う。決して表にはでないが、大きな努力に違いない。また、毎日のランプランをウェップに上げ、必要な更新を行っており、これも目立たないが、とても大変なことだと思う。私が比較的の自由に加速器コントロール棟制御室や筑波実験棟に出没し、いろんな方と話ができたのは彼女の影のサポートのおかげであることは間違いない。

「Teşekkür ederim, Hülya !」

### 4.2 さらに $\beta_y^*$ をしぶって

上記したように、このラン期間は 2020 年の夏までに  $100 \text{ fb}^{-1}$  以上のデータを蓄積するためのマシンスタディとして位置付けられた [4]。10 月 15 日から立ち上げが始まり、まずはシャットダウン前の運転状態への復旧である。その後、順調に  $\beta_y^*$  をしぶり、1 mm まで到達したのが 11 月中旬である。

Belle II が HV オンにした状態でルミノシティが、Phase2 の目標としてあげた  $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を超えたのはこの時期である。

この運転期間には、Belle II 側ではユニット数を増やした High Level Trigger の不安定性、入射の veto の時

間構造などの問題、HER 入射の不調などが大きな課題であったが、ここではふれない。個人的なことなのだが、この時には私自身の立場が変わっており、2020 年 3 月終わりで RC を退くことが決まっていた。次の RC の方が私のシャドウとしてすでに活躍されており、これらの話をする機会があれば次の RC に譲りたい。

2020 年 5 月現在 Belle II と SuperKEKB 加速器は、積分ルミノシティ  $100 \text{ fb}^{-1}$  以上を目指し、順調に運転中である<sup>1</sup>。新型コロナウィルスによる影響で、シフト体制、ミーティング体制などの大きな変化に対応しながら運転している。

最後に RC として大切と考えていたことを述べたい。

大きな目標は実験グループが決めることであるが、現場のプランなどはすべて自分で決めていた。必要な報告は Technical board などで行っていたが、決めるのは DRC と相談の上、自分の責任で行うという形を維持してきた。現場では常にスピーディな判断を求められる。どこかのミーティングに判断をゆだねると時間がかかり、責任の所在も曖昧となってしまう。これではいけない。しかもそれは RC の形骸化にもつながりかねない。

次に適切な判断をする努力として、加速器の方、各検出器のエクスパートの方とコミュニケーションを取り、最新の情報を得ておくように心がけた。このために、KCG ミーティングやランミーティングはもちろんのこと、個人的にも機会をみては、エクスパートの方と加速器や検出器の現状や問題になりそうなところなどを話し合ってきた。それらの情報をもとに、いつも気持ち的には「現状の二歩先を考える」つもりでやってきた。それでも、多くの間違ったことをしてきたと思う。本当に難しい。

このようなスタイルが良いかどうかはわからないが、運転が進むにつれて、その時々の適した形に変化していくことだろう。

## 5 おわりに

これは私が RC を務めた 2 年間の出来事を手元のメモをもとに記憶をたどりつつ書いたものである。記憶違いなどで間違いがあるかもしれない。その時はご容赦願いたい。

この 2 年間はとても忙しく、いろいろと迷い悩みながら過ごしてきたが、Belle II 実験の立ち上げの時期に RC として運転に関わったことは幸運であったと今になって思う。協力して頂いたすべての方々に心から感謝したい。

Belle II 実験はこれからも長く続く。1 人のコラボレーターとして微力ながら今後も貢献できたらと思っている。

## 参考文献

- [1] 高エネルギー加速器セミナーテキスト 1994 年 9 月, 同テキスト 2019 年 9 月.
- [2] 第 114 回 B ファクトリー計画推進委員会の報告資料, 2018 年 8 月 21 日.
- [3] 宇野 彰二, 高エネルギーニュース 30-3, 165(2011).
- [4] 第 116 回 B ファクトリー計画推進委員会の報告資料, 2019 年 10 月 3 日.

<sup>1</sup>蓄積した積分ルミノシティは以下のページで見ることができる。  
<https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity>