### 特集2 KEKBBファクトリーのコミッショニング

# 衝突点周りの話題

佐藤 康太郎\*

#### Issues Relating to the Interaction Region

Kotaro SATOH\*

## 1. 有限角度衝突案までの歴史

KEKBのIR (Interaction region) の設計は90年頃からBelleのbackground解析と協力しながら活発になってきました.この頃から年に2回程度,所内でMini-workshopを開きましたが、そこでの報告集,国外でのworkshopの報告集,KEKB Design reportなどをもとに話をまとめてみます.報告集などからスキャナーで取り込んだ図があり不鮮明ですが、歴史ということでお許しください.

この時点で、設計目標ルミノシティ及びビームの基本的なパラメーター、ビーム電流、全てのRFバケットにバンチをつめる、いう最終案にすでに設定されていました。そこでは、バンチ間隔が短いことによるparasitic collision を避けるために crossing angle 衝突しかないであろうし、crab cavity も必要であろうと想定されていました。またトリスタントンネルは周長が長過ぎるので、周長が約 $1500\,\mathrm{m}$ のレーストラック型の新トンネルに2リングを入れる、さらには3番目の入射リングも入れるかもしれない、という案でした。

しかしながら、crab cavity が本当にできるのか、必要とする性質のよい大電流をはたして蓄積できるのか、という心配もありました。そこで IR の設計方針として、最初に良く理解されているであろう head-on 衝突を想定することになりました。この場合には parasitic collision を避けるためにバンチ間隔を 5 倍に広げる必要があり、ルミノシティもその分減少するので、これを 1/5 オプションと呼んでいました。まず 1/5 オプションの運転で様子を見ながら crab cavity 等の開発を進め、最終型へ IR を改造して進もうという想定だったと思います。

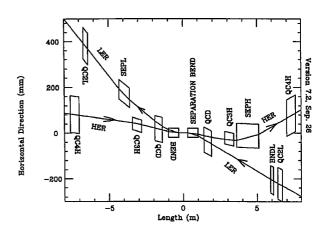


図1 1990 年設計当初の IR のレイアウト.

ビーム衝突の観点から通常の head-on 衝突で IR の設計を始めたのですが、実は機器製作の観点からは crossing angle 衝突の方がはるかに容易であることが後で判明することになります。図 1 に 90 年の時点での IR 設計のレイアウトを示します。軌道分離のための separation bend は当初 permanent magnet を採用していました。QCD は超伝導で、他は常伝導磁石としてあります。QC3H(現 QC1L/RE)は HER の下流側では、現設計と同じいわゆるハーフ四極を採用しています。HER と LER の軌道分離が不足しているため、両リングで IP の下流側に無理やり septum 磁石が入れてあります。

IR 設計としてもう一つの課題は測定器への background ノイズで放射光(X線)によるものと,エネルギーを失ってやってくる spent electron によるものがあり,Belle が担当するノイズ対策と加速器の機器配置とが同時に成立しなければなりません.

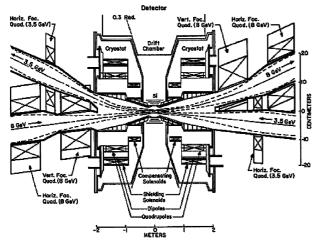
1992年4月にSLACでAsymmetric B-factory wor-

<sup>\*</sup> 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 (E-mail: kotaro-satoh@kek.jp)

kshop があり、KEK, SLAC, Cornell 大学の計画が議論されました。KEK 案はまだ head-on 衝突で、ただし separation bend には permanent magnet の他に超伝導磁石案も検討されていました。軌道分離に permanent magnet を使うとエネルギーを変えることは難しいし、KEK では permanent magnet の経験がなく技術的な課題も予想され、一方では最終収束のQCD が超伝導なので separation bend を超伝導にして同一のクライオスタットに入れることは容易なことでした。別案として、 $\pm 2.3$  mrad の控えめな crossing angle 衝突の素案も発表しましたが、このころから crossing angle 衝突が KEK でも比較対象となりました・

同時期に設計を進めていた SLAC では head-on 衝突で設計ルミノシティを達成するというものでした. IR 部の軌道分離も収束も permanent magnet で構成することによって加速器機器をコンパクトにし、測定器の中心部分を含めそれらをカーボン繊維の長い薄肉円筒で支持した上で、円筒全体を測定器の中へ挿入するという大胆な案で、結局は採用されることになります。この時点で SLAC は基本的に IR の最終案にすでに到達していたというわけです。対岸の LBL も共同で計画に参加していて、そこには加速器におけるpermanent magnet の開拓者であり大専門家であるK. Halback 氏の貢献があって、permanent magnet の採用に踏み切れたのだと思います。

もう一つの競争相手である Cornell 大学は**図 2** に示すように separation bend が不要な ± 12 mrad の crossing angle 衝突で、超伝導磁石による最終収束系



**図2** 1992 年の workshop での Cornell 大学の crossing angle 衝突案ですが、実現されませんでした. エネルギー、衝突角及び配置案はこの時点で現 KEKB を先取りしています.

を持っていて、crab cavity の設置を想定していました. 彼らは加速器機器設計と background ノイズ解析の観点から head-on 衝突と比較し、crossing angle 衝突案に達していました. 結果的には KEK の最終設計は基本的に Cornell 大学の案を採用したと見なせます. 今振り返ってみると、SLAC も Cornell 大学もIR 設計に関して KEK のかなり前を進んでいたことが分かります.

その後も KEK では head-on 衝突の 1/5 オプションの設計はなかなか固まりませんでした. 最終収束系の超伝導磁石は図 3 に示すように Belle のソレノイド磁場の中に設置されますが,そのクライオスタットはend yoke を通る長い腕によって測定器の外部から片持ちで支持されねばなりません. 軌道分離の偏向磁石がクライオスタット先端部にあると,測定器内のソレノイド磁場によって力を受け,支持の腕が長いため超伝導磁石全体の位置が動いてしまいます. さらに,超伝導で偏向磁場を作ると四極磁場の場合よりも測定器への漏れ磁場が広い範囲で影響があり,漏れ磁場がない二層コイルによる超伝導磁石の設計なども試みられました.

1993 年末 Mini-workshop において  $\pm$  10 mrad 程度 の crossing angle 衝突案で最初から運転を始め,IR の変更なしに設計目標を目指したらどうかと提案しました。そもそも crossing angle 衝突を最初に避けたのは,DESY でなされた有名な crossing angle 衝突実験の結果によっています。シンクロベータ共鳴(synchro-betatron oscillation resonance)によって,ルミノシティが低下してしまったということでした。しかしながら,実験の論文を読んでみると,結果が誤解さ

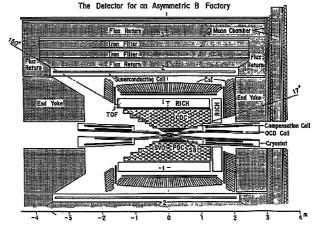


図3 1990 年末での Belle 測定器内の separation bend と超伝導電磁石クライオスタット. 先端に 2 組の permanent magnet が固定されています.

れているように思います。すなわち、まさに共鳴なの でシンクロトロン振動数とベータトロン振動数がある 関係を持つ時に限り現象が発生したというものです. 共鳴条件以外ではルミノシティの低下はありません. 実際の運転では、リング内に複数個のバンチを蓄積さ せるのですが、加速空洞に起因するバンチ結合不安定 性が発生します. ところがこれによるバンチ振動を抑 制するためのfeedback系がなかったために、個々の バンチのベータトロン振動数が広がるような装置を導 入して,バンチ結合不安定性を避けていました.しか し,ベータトロン振動数が実効的に広がったために, シンクロベータ共鳴条件を避けられなくなったという ことでした. ですから、もしベータトロン振動数の広 がりがなければ、シンクロベータ共鳴の条件をはずす ことができて crossing angle 衝突は安全だということ になります. しかしまだ話の先があって、KEKBの 設計ルミノシティでは衝突点でのビーム・ビーム効果 によるベータトロン振動数の広がりが、シンクロトロ ン振動数を越える程度になるので、やはり安全衝突と は断定できない事情があります.

この時点で crossing angle 衝突案に移行しつつあっ た理由はいろいろあるのですが、1)この頃に角度付 き衝突でもシンクロベータ共鳴の効果を避けられるか もしれないという研究結果が出されたこと,2)また たとえシンクロベータ共鳴があったとしても設計値の 半分程度は期待できるのでないか、それよりも、性質 のよい数千バンチで 1A 以上のビームを蓄積できるか どうかという方が設計値へのリスクとして大きいので ないか,3) head-on 衝突や衝突角が小さい場合は機 器設計,特に separation bend の成立が困難である, 4) さらにはノイズ解析からも crossing angle 衝突の有 利さが理解されてきたこと、があげられます. KEKB 計画では毎年外部の加速器の専門家を招いてレビュー をしてもらっているのですが、多くの専門家が crossing angle 衝突の実現を危惧していて、シンクロベー タ共鳴の効果が顕著である場合も想定して, その backup として間に合うように crab cavity の開発を進 めるという計画にしました. この crossing angle 衝突 は予想以上に成功して, KEKB は crab cavity の導入 なしに設計目標を達成することになります.

1994年末にKEKB加速器のDesign reportをcrossing angle 衝突案でまとめたのですが、その直前の9月にあった所内のMini-workshopでさえも依然としてcrossing angle 衝突について確信が持てず、やってみるまでは分からない、という雰囲気がありました。これまで考えつく範囲の解析でcrossing angle 衝

突が不可能だという結果が出たことはなく、KEK 加速器屋の考えが及ばない人智を越えた理由でだめな場合にはしょうがないので、まだその技術的課題さえも十分には理解されていないが、crab cavity に助けてもらおうという覚悟だったと思います.

#### 2. 建設,立ち上げ

その後はこれまでの head-on 衝突の検討結果を生かし、衝突角が大きくなったこともあって機器製作のための設計は順調に進みました.特に、Belle 測定器内に入る最終収束系の超伝導磁石は漏れ磁場があるため、測定器の組み上げ時間を考慮すると Belle 内での磁場測定を運転開始の1年前までに終了させる必要があり、IR 部の軌道、真空、特殊形状の四極磁石、ノイズ対策などの設計も成立することを確認した最終案が急いで決定されました。超伝導磁石の立ち上げは期限内に完了するのですが、そもそも運転開始時期は全力でとりかかる加速器の完成にあわせて決めたもので、機器の中でも製作が難しい超伝導磁石系をその1年前に完成させたのは特記すべきものです。

設計は容易になったといっても, 完成されたものに は至る所にこれまでにない挑戦的なアイデアを必要と しました. 完成図は書けるが実は組み立てられないと いうのは技術者として恥ずべきことですが、組み立て 方に工夫を凝らして不可能と思える構造をしている部 分があります. 例えば、図3で end yoke は外すとし ても, クライオスタットを通る外向きに太くなってい る真空パイプをどうやって Belle 中心にあるパイプと 接続できるでしょうか. パイプを先に接続するとクラ イオスタットは測定器の中へ挿入できないし、クライ オスタットを先に挿入するとパイプ接続ができないと いう課題は、接続部をクライオスタットの挿入と干渉 しない条件でまずできるだけ衝突点から離し, クライ オスタット挿入後に長い棒状のレンチでクライオスタ ット内の接続部を締め付けるという工夫をしました. 超伝導磁石では四極磁場と Belle のソレノイド磁場を 相殺するソレノイド磁場の他に, 補正用に水平垂直磁 場と skew 四極磁場が要求されました.

また、IR 部には超伝導磁石の他に、最終案の図4に示すようにLERとHERの軌道が近いにもかかわらずそれぞれのリングを独立に収束させるための6台の特殊形状の常伝導4極磁石があります。そのうちの衝突点に一番近い、図5で示す2台について触れてみます。HER上流側のQC1LE(衝突部4極磁石で1番目の左側の電子用)では、両リングの軌道差が小さいためコイルの断面積を最少にする必要があ

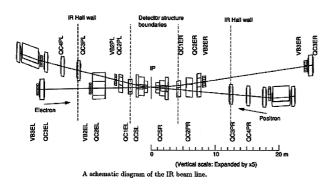


図 4  $\pm 11$  mrad の crossing angle 衝突の最終案. ただし 1996 年時点の磁石名称で,左右 L/R がリング E/P の後になっています.

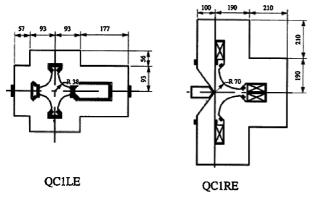


図5 衝突点に一番近い常伝導電磁石の断面図. 主コイルの他に、補正巻も使って磁場補正をしています. QC1RE はいわゆるハーフ四極型.

ります.この磁石で注目すべきはホローコンダクターコイルの電流密度で 85 A/mm² に達します.温度上昇を抑えるため磁石全体で 12 ターンのコイルはターン毎に冷却水が並列接続されています.もし冷却水が止まると秒単位の時間でコイルが溶けることが予想される大胆な設計です.

実は、この磁石において悪い予想が当たり本当にコイルが溶断してしまった事故がありました。運転当初からなぜか冷却水がコーラの色に変色しやすいのでQC1LEの冷却水温度が高いこととの関連が疑われて

いました. 1年ほどたって、ホロコンがペラペラにすり減ってコイルの溶断が起こりました. 原因は、コイル内の冷却水温が高くかつ流速が速いので、保護膜となるべき銅の酸化膜がはがれて酸化が進んで内面が削られることが想像されました. 確かにコーラ色は酸化銅によるものでした. 対策として急遽冷却水系に脱酸素装置を導入しました. 高水温、高流速ではホロコンが含これが KEK 加速器では脱酸なずが、うかつながらこれが KEK 加速器では脱酸ですが、うかつながらこれが KEK 加速器では脱酸を置の最初の導入でした. また、コイル温度が高くかった。また、コイルの全てのターン毎にあると冷却水が止まります. コイルの全てのターン毎に両端の電圧差を常時監視して、電圧差が上昇したらまり、温度上昇と見なして電源を停止させることにしまりた. 残念ながら、幸いにも監視装置の発報はまだありません.

下流側にあるQC1REはいわゆるハーフ四極というもので、左右の半平面の片側の磁場部分のみを使用するものです。この形状もKEKでは初めて製作するもので、3次元磁場解析コードを駆使し、また現物の磁場測定結果を元に磁石端部の磁極のシム形状と補正巻の電流の最適化を行うことを繰り返し、また他方のリング軌道での漏れ磁場を下げるための磁気シールドの最適化を行い、要求された磁場性能を満たす磁石を完成させました。

自慢話めくことを最後にお許しいただけるならば、設計が難しいにも関わらず R&D をする時間の余裕がなく、ぶっつけ本番で作った真空系や電磁石を含めて組上げたものは運転開始後に不都合が見つかって1、2年後には作り換えるであろうと覚悟をしていましたが、一部の真空パイプの破損による交換以外には、現在まで運転開始時のままです。この他にも、IR 付近の建設には課題が山積していたのですが、加速器と測定器の関係も極めて良好で共同で課題を解決し、やはり最初から完成度の高いものになったと思っています。加速器及び測定器の関係者に敬意を表するものです。