

寄稿

回想—B ファクトリー計画

木村 嘉孝*

Looking Back on the KEK B-factory Project

Yoshitaka KIMURA*

1. はじめに

B ファクトリーについては、現在の研究施設建設以前にも KEK で何度か検討されたいきさつがある。最初は、トリスタンとして 30 GeV 電子・陽電子コライダーの建設が提案された 1980 年頃、研究者の一部に、加速器と実験共にビームコライダーの経験が無い段階で、突然当時としては世界最高エネルギーの研究施設を建設するのは大きなリスクが予想され、むしろ規模が手頃で、研究目的もはっきりしている B ファクトリーにするべきではないかという議論があった。このような中トリスタンは、1981 年度に 30 GeV コライダー (MR) の前段としての 8 GeV 入射蓄積リング (AR) の予算が認められ建設が始まっている。しかしこの時点ではまだ 30 GeV リングを含む計画全体の予算が認められたわけではなかった。そこで予算が遅れて AR 完成から MR 完成までに時間が空く場合も考え、AR でも B 中間子物理のための電子・陽電子衝突実験ができるよう、そのリングには 6.5 GeV のコライダーとして使える加速器性能を持たせ、また建物にも南北 2 箇所ビーム衝突実験のための実験室を配置した。実際には AR に引き続き、翌 1982 年度に MR の建設予算が認められたので、AR がビームコライダーとして使われることはなかった。このコライダー機能については、当初から将来 AR を放射光の研究施設として利用する場合には有効になるという考えであった。実際 AR は後年放射光専用施設に転換された。

一方、この AR を B ファクトリーとして利用するという案は、一部の実験研究者の間ではなお真面目に考えられていたようで、AR が完成し、電子と陽電子ビームの加速に成功した 1985 年に、AR を B ファク

トリーとして活用するためのアップグレード計画が、トリスタン物理実験計画諮問委員会 (TPAC) に提案された。更にこの研究者グループは、1987 年にはこれを正式な実験提案にまとめ TPAC に提出した。当時は丁度トリスタン MR による世界最高エネルギーのビーム衝突実験が始まった頃で、この提案は承認されなかった。しかし TPAC は、将来 B ファクトリー計画が重要な位置を占める可能性もあり得るとして、加速器グループに、実現し得るルミノシティなどを調べるよう要請した。

これを受けて加速器グループは、当時 AR で幾つかのビーム開発実験を行っていたが、実際に B ファクトリーに向けていろいろな検討に熱が入ったのは、1987 年に、B 中間子の崩壊で CP 対称性の破れを正確に測定する手段としての非対称エネルギー B ファクトリーの案が出た後である (発案者は LBL の P. Oddone 氏ということになっているが、他のところでも同様なことは考えられていたようである)。筆者の記憶では、当時物理研究系総主幹であった菅原氏から、非公式ながら、この非対称エネルギーコライダーの可能性を加速器グループとしても調べるよう依頼されたことが計画推進の大きなねになったと思う。実際この後いろいろな計画案が精力的に検討され、紆余曲折はあったが 1992 年にはほぼ現在の B ファクトリー計画に落ち着いた。一方この頃になるとトリスタンのエネルギー領域にはトップクォークが無いことがはっきりし、トリスタンの接続計画としての B ファクトリーの建設が最優先の課題として位置づけられた。その結果 1992 年度からは概算要求に B ファクトリー計画を含めることとなり、1993 年度の予算内示、1994 年度の建設開始に至った。

本特集号には B ファクトリーの建設・運転・開発

* 高エネルギー加速器研究機構
(E-mail: yoshitaka.kimura@kek.jp)

に従事された多くの方々が寄稿されるようであり、研究施設についてはそこで詳しい説明がなされると思われるので、ここでは主に建設開始までのいきさつについて述べてみたい。最初に建設開始までの経緯を簡単にまとめ、さらに加速器施設について、最終案にいたる段階で計画の成否を左右する決断になったと思われる、トリスタンMRのBファクトリーへの転用と、当時放射光とトリスタンARへのビーム入射に使われていた2.5 GeV リニアックの、8 GeV 電子と3.5 GeV 陽電子入射器へのアップグレードについてやや詳しくふれておく。

2. Bファクトリー建設開始までの経緯

ここでは、Bファクトリー計画を検討する公式の場であったTPACでの議論をベースに、建設開始までの概略を年度ごとに追ってみる¹⁾。

1985年度：TPACに、B中間子実験のためのARアップグレード案が提出された。それに対し、トリスタンの全体計画に支障の無い範囲で計画検討の継続を認める答申が出された。

1986年度：前年度に続くB中間子実験のためのARアップグレード案についてTPACは、CLEO-IIなどを凌駕できるだけの加速器や測定器を用意できるか検討すべしとした。

1987年度：前年度のTPAC答申に沿った検討の結果として、ARによるB中間子物理の研究が実験テーマとして正式に提案された(KEK Internal 88-1)。これに対しTPACは、ARの改造や測定器の建設等にかんがりの人的、財政的資源が必要であるが、その時点では展望があるとは言い難いとした。一方でTPACは、B中間子の物理が将来KEKにとって重要な研究プログラムとなる可能性も十分にあり、本実験提案グループも含めて広く研究者を糾合し、世界的に十分対抗できる加速器と測定器について準備研究を行なうよう求めた。

1988年度：前年のTPACの結論を受けて、加速器と測定器について準備研究が進められたが、従来のAR案に加え初めて非対称エネルギーのコライダー案が検

討された(この時には、MRの実験室に小さなリングを建設し、14 GeVと2 GeVのコライダーとする案等が考えられていた)。これに対しTPACは、非対称エネルギーに起因する加速器や測定器の様々な問題を詳細に調べること、さらにその設計研究においては、現存する機器や建物による制限に囚われることなく、世界最高性能の研究施設を目指すべきことを勧告した。1989年度：Bファクトリーの加速器と測定器について本格的な検討作業を進めるためにタスクフォースが形成され、周長約1.2 kmのトンネル新設を含む、3.5 GeV・8 GeVの非対称エネルギー陽電子・電子コライダーの設計案がまとめられた(KEK Report 90-24)。TPACはこれを高く評価し、その建設に向けて、 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ のルミノシティが実現可能なデザインレポートの早期作成を要請した。

1990年度：前年のTPACの結論に従い、タスクフォースが非対称エネルギーBファクトリーの詳細設計を行なった。TPACは、これにより研究施設の実現可能性が示されたとし、計画実現に向けて研究所が努力するよう勧告した。

1991年度：施設設計を具体化する中で、1.2 kmの新トンネルを建設する案と並行して、3 kmのMRを転用する可能性についても詳細な検討が行われた。これに対しTPACは、新トンネル案がより魅力的としつつもMR案も実現可能と判断し、CP対称性の破れの研究の重要性に鑑み、出来るだけ早く公式な計画承認が得られるよう最大限の努力を研究所に求めた。

1992年度：TPACの勧告を受けてKEKは、1994年度からのBファクトリー建設に向けて概算要求の準備作業に入った。その過程で予算的な条件(特に文教施設費関連)から、新トンネル案は実現が困難として、BファクトリーリングはMRトンネルに建設することを決めた。これに対しTPACは、早急に加速器の詳細設計を完了し、国際的なレビューを受けることや、実験提案の公募を行ない、早急に国際的な共同利用実験組織を立ち上げることを勧告した。

1993年度：Bファクトリーの建設が5年計画として承認され、1994年度予算に内示された。TPACはこれを受けて、加速器については、特別委員会を設け、設計の詳細(KEK Report 95-7)を評価することを要請、測定器については、BELLEグループの実験提案を承認し、さらに詳細な技術提案を早急にまとめるよう求めた。

1994-1998年度：建設期間。参考のためにBファクトリーの年度別建設予算を表1にまとめる。

¹⁾ 1985-1993年度のTPACの委員：岩田(88-93)、尾崎(85-91)、折戸、木村(89-93)、北垣(85-87)、小林(88-93)、三田(92-93)、菅原(85-88)、高橋、藤井(85-91)、山口(85-87)、山田(88-93)、P. Oddone(92-93)、R. Schwitters(85-87)、P. Söding(85-87)、R. Taylor(88-91)、G. Wolf(88-93)。なお1994年度以降TPACはレプトンコライダー計画諮問委員会(LCPAC)に引き継がれた。

表 1 B ファクトリー年度別建設予算

(億円)

		1994	1995	1996	1997	1998	合計
大型特別機械整備費 354.0 億円	加速器	14.6	52.6	77.7	61.3	82.3	288.5
	測定器	5.4	16.4	23.8	6.7	7.7	60.0
	共通			2.0	2.0	2.0	5.5
文教施設費 23.8 億円	入射器棟増築		7.2	11.3			18.5
	MR 直接入射路			2.0	3.3		5.3

3. トリスタン主リングの転用

1987 年に非対称エネルギー B ファクトリーの案が出た直後は、出来るだけ早く且つ安価で、しかも進行中の実験に与える影響を少なく建設できるということで、高エネルギーリング (HER) として既存の AR や MR を利用し、その実験室に小型の低エネルギーリング (LER) を作って対応する案が検討された。しかし 1989 年に出た、ビーム・ビーム効果に起因するビーム不安定性の観点からは、HER と LER の周長を同じに選ぶことが望ましいという研究報告 (K. Hirata & E. Keil, Phys. Lett. **B232** 413, N.I.M. **A292** 156) によって状況が一変した。そこで上に述べたように TPAC の意向を受けて、先ず周長約 1.2 km のトンネルを新設し、加速器性能を最適化した案がまとめられた。しかし検討を進めるうちに、経費的、時間的な条件からこの案は実現が困難と分かり、結局 MR のトンネルに B ファクトリーを建設することとなった。特に新設トンネルの工事期間や、転用する場合の 24 億円に対し約 100 億円と見込まれた文教施設費が大きな要因であったと思われる。

しかし MR 転用にも解決すべき問題がいくつかあった。主なものは、当時なお活発にビーム衝突実験を続けていたトリスタンの終了時期、また B ファクトリーと並行して進められていた MR の放射光利用計画の取り扱いなどである。

トリスタンは、LEP で実験が軌道に乗る 1989 年までは、最高エネルギーに重点をおいた研究を進めていたが、1990 年からはルミノシティを蓄積する精密実験のフェーズに移っていた。そこで 1992 年に各実験グループが詳細な検討を行った結果、 300 pb^{-1} の積分ルミノシティが蓄積される時点で実験を終了することとし、達成時期の目標を 1994 年とした。実際には 1995 年の夏まで運転され、グループあたりの積分ルミノシティは $340\text{--}390 \text{ pb}^{-1}$ に達した。

放射光利用については、1986 年頃から放射光利用

研究者の間で始まった将来計画に関する議論の中で、1988 年頃一つの可能性として、MR を 5–10 GeV の光源に転用する案が浮上した。これを受けて KEK もこのオプションを真剣に検討することとなり、1992 年には MR 放射光施設 (Super Light Source Project, KEK Progress Report 92-1) として KEK の将来計画に組み込まれた。これは当然ながら B ファクトリー計画と競合することとなり、一時は MR トンネルに B ファクトリーの HER と LER に加え放射光用の第三のリングを建設する案も検討された。しかし 1993 年に、研究所の方針として、放射光計画は実現するにしても B ファクトリー実験の終了後とすることを決め、トリスタン実験終了後の 1995 年秋から約 1 年間 MR を放射光利用専用で運転することでこの問題を解決した。この決定には 1991 年から建設が始まっていた 8 GeV の第三世代光源 SPring-8 の影響が大きかったと思う。

4. 入射器のアップグレード

B ファクトリーの目標ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ は、トリスタンで得られた $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と比較して桁違いに大きく、そのために必要な衝突リングのビーム電流はアンペアレベルに達する。このような大電流を蓄積・貯蔵する衝突リング自体には、もとより多くの解決すべき課題が存在したが、一方この大電流ビームを供給する入射器システムをどうするかも大きな問題であった。特に B ファクトリーを 1.2 km の新トンネルではなく 3 km の MR トンネルに建設することにした結果、入射器に対する要求はますます厳しくなった。当初はトリスタンと同様 AR をブースターとして使う案も検討されたが、入射器のアップグレードが技術と予算上可能であれば、B ファクトリーリングに直接入射の方がビーム蓄積の効率が良いことは明らかであったので、1992 年に、全てを入射器グループの力に賭けることとしてこの直接入射方式を選択した。この場合入射器にはトリスタンと比較し

て、ビームエネルギーを、電子・陽電子とも 2.5 GeV から電子 8 GeV, 陽電子 3.5 GeV に、またパルス当たりのビーム強度を、電子 0.32 nC, 陽電子 0.032 nC から電子 1.28 nC, 陽電子 0.64 nC に増強することが求められた。

この要求に対応するためにとられた主な処方は、エネルギー増強のためにリニアックの全長を約 1.4 倍、敷地が許す限界まで延長し、さらに加速の電界強度をそれまでの約 9 MV/m から約 20 MV/m に上げる。一方ビーム強度の増強については、加速の繰り返しをそれまでの 25 Hz から 50 Hz に、また特に大幅な強度増大が必要な陽電子については、生成のための電子ビームエネルギーをそれまでの 0.25 GeV から 4.5 GeV に上げることなどである。しかしこれらは幾つかの新しい装置開発を必要とした。例えば、20 MV/m の電界強度を得るためには、マイクロ波源としての S バンドクライストロンをそれまでの 30 MW から 60 MW のものに交換し、更にその後 RF パルスを圧縮してピーク電力を 2 倍にするエレメントを挿入しなければならない。実際に責任者の佐藤氏以下入射器グループはこれらの開発研究に全力を傾注し、この困難な計画を見事に成功に導いた。一つ付け加えておくとすれば、これら高電界加速装置の製作においては、当時 JLC (Japan Linear Collider) のためにリニアコライダーグループが SLAC と協力しながら開発していたクライストロンや SLED (SLAC Energy Doubler) の研究成果が大いに役立ったと言ってよいであろう。

5. おわりに

B ファクトリー研究施設 (KEKB) の建設は予定通り 1998 年に完成し、2001 年には多くの方々の努力の結晶として、B 中間子崩壊における CP 対称性の破れを見事に検証することができた。しかしその公表は、奇しくも SLAC の B ファクトリー (PEPII) と同時になった。ここで、上に述べたような計画立案時や以降の建設からコミッショニングに至る間の様々な出来事を振り返ると、少しでも問題の解決を誤ったり、或いは対処に手間取ったりしていたら SLAC の後塵を拝することになった訳で、危ない橋を渡るような状況をよくこう何度も乗り越えてこられたものだとの感が深い。

実際、計画をスタートさせようとしていた 1990 年代の初め頃には著名な外国の研究者からいろいろな忠告や提言をいただいた。多くは、加速器研究の歴史や実力において KEK より遥かに勝る SLAC を相手に、同じ内容の計画で競争するのは無謀であるというものであった。その中でも、親しかった DESY 加速器責任者 G. Voss 氏の、このままの入射器システムでは陽電子の強度に不安があり、SLAC のように途中にダンピングリングを新たに挿入すべしとの提言や、PEPII 計画責任者 J. Dorfman 氏の、3 km のトリスタン MR は彼らの PEP リングのほぼ 1.5 倍であり B ファクトリーとしては所定のルミノシティが得られない可能性が大きい、是非 1.2 km の新トンネルにすべきであるという忠告などにはいささか当惑したが、今となっては懐かしい思い出である。