

FCC—次世代円形衝突型加速器

生 出 勝 宣^{1, 2, 3, *}

¹CERN, Esplanade des Particules 1, P.O. Box 1211 Geneva 23, Switzerland

²University of Geneva, 24 rue du Général-Dufour 1211 Genève 4

³高エネルギー加速器研究機構（KEK） 〒305-0801 つくば市大穂

(2022年7月15日受付；2022年8月2日掲載決定)

FCC — The Next Generation Circular Collider

Katsunobu OIDE^{1, 2, 3, *}

¹CERN, Esplanade des Particules 1, P.O. Box 1211 Geneva 23, Switzerland

²University of Geneva, 24 rue du Général-Dufour 1211 Genève 4

³KEK, Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

(Received July 15, 2022 ; Accepted August 2, 2022)

FCC is a project for a next generation circular collider based at CERN, as the next step of LEP/LHC experiments. It will have at least two stages : (i) measurements on electroweak (Z/W), Higgs, $t\bar{t}$ by e^+e^- collision (FCC-ee) and (ii) energy frontier pp collision (FCC-hh) up to 100 TeV center of mass (CM) energy. Both will be performed by colliders in the same tunnel with 90–100 km circumference built around the Geneva area across the Swiss-French border.

KEYWORDS : particle accelerators, colliders

1. はじめに

Future Circular Collider (FCC) 計画は CERN (欧洲原子核研究機構) が中心となって推進する次世代の円形衝突型加速器計画である。CERNにおいては 1980 年代から Large Electron Positron collider (LEP, 電子陽電子衝突)/ Large Hadron Collider (LHC, 陽子陽子衝突) (周長 27 km) が建設・運転され、現在も稼働中である。LEP/LHC は既に 30 年以上にわたり素粒子物理学の最前線の衝突型加速器 (コライダー) として活躍してきたが、さらに高輝度化 High-Lumi LHC (HL-LHC) をおこない、ほぼ 2040 年までの運転計画が決定されている。このように大型加速器計画は運転期間だけでも 50 年を単位とするものである。ちなみにこの点では高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子コライダーである TRISTAN/KEKB/SuperKEKB も同様の時間規模を持っている。FCC もまた、LEP/LHC と同様に 50 年間を目処とする長期計画と

なる。

FCC は 2012 年頃から萌芽的な提案は行われてきたが、2014 年 2 月の Kick-off Meeting¹⁾で名称の確立とともに本格的な概念設計作業に着手した。その結果、2019 年 1 月には概念設計書 (CDR)^{2~6)}を完成・出版し、現在は EU・CERN の元に、実現のための詳細設計段階 (FCCIS) に入っている⁷⁾。なお、FCC の名称は Future Circular Collider の頭文字に由来するが、いつまでも “Future” という訳にはいかず、近々 “F” は別の語を表すように変更されるであろう。

CDR/FCCIS には世界から 150 以上の大学・研究機関が参加し、KEK もその一員である。各年の進捗状況はほぼ毎年開催の FCC Week 会議で集約される。2022 年 5 月のパリ会議⁸⁾の場合、まだ米国・日本・中国等の渡航制限やウクライナ戦争下ではあるが、269 名の直接参加、214 名のリモート参加があった。ちなみに以下の設計数値は FCC Week 2022 での発表に基づく。

* E-mail : katsunobu.oide@cern.ch

Table 1. Main design parameters of FCC. Each represents a quantity per beam. FCC-ee plans to operate at least 4 different energies to produce the Z-boson, W^\pm pair, Z-Higgs(h) pair, and pair of top quark ($t\bar{t}$). The parameters for W^\pm are omitted due to the column width.

IP : interaction point, SR : synchrotron radiation

Item	FCC-ee			FCC-hh
	Z	Zh	$t\bar{t}$	
particles	e^+e^-			pp
Beam energy	GeV	45.6	120	182.5
Circumference	km		91	
Stored beam current	mA	1280	27	5
Number of IPs			4	2+2
Number of bunches		10000	248	40
Stored beam energy	MJ	17.5	0.97	0.27
SR loss	MW		50	2.4
Accelerating voltage	GV	0.12	2.1	11.3
Luminosity/IP	1/nb/s ^a	1820	73	12.4
				300

^a1/nb/s = $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

2. FCC の性能目標

FCC の最新の主な性能目標を Table 1 に示す。なお FCC-ee では W^\pm の実験（ビームエネルギー 80 GeV）も予定されているが、紙幅の関係で割愛した。FCC-hh の衝突点数は LHC と同様、高・低ルミノシティ各 2 となっている。FCC は LEP/LHC の拡大版と考えても良く、FCC-hh と LHC は概念的にはほぼ相似であるが、FCC-ee は LEP とは大幅に違っている。LEP は一つのリングに e^+e^- の両方を蓄積するが、FCC-ee はそれぞれ別のリングに蓄積する。この点では LEP よりも KEKB や PEP-II（米国スタンフォード大学、SLAC 研究所）などの B-ファクトリー（5 番目のクォーク b を含む B 中間子を大量に生成しその性質を調べる加速器計画）との類似性を持っている。FCC ではトンネル・実験室のサイズなどの関係から、FCC-ee と FCC-hh の加速器は共存せず、FCC-ee の実験後は FCC-ee の加速器は撤去し、完全に FCC-hh に置き換える計画である。これは LEP/LHC の場合と同様である。

Table 1 は FCC-ee (e^+e^-) と FCC-hh (pp) を併記しており、通常このような比較はあまりおこなわれないが、実はいくつか気づくことがある。たとえば放射光 (SR) によるエネルギーロスは、粒子のローレンツ因子 (γ) の 4 乗に比例するが、同じエネルギーの粒子で比べると e^+e^- は pp の 1.1×10^{13} 倍も放射エネルギーが大きい。これが円形の e^+e^- コライダーの蓄積電流（ルミノシティも同様）についての基本的な制約になる。Table 1 で FCC-ee の蓄積電流が Z と $t\bar{t}$ で約 250 倍も違うのは放射光ロスを一定値（ビーム当たり 50 MW）に保った結果である。逆に、pp コライダーでは e^+e^- よりも何桁も高いエネルギーに到達できる。しかし、実は pp コライダー

であっても、FCC-hh くらいエネルギーが高くなると、放射光ロスももはや無視できるものではない。通常の陽子リングでは何桁も放射量が低いのに、Table 1 にあるように、FCC-hh の放射光ロスは FCC-ee の約 1/20 にまでに高くなっている。FCC-hh はアーク部全体が 2 K の超伝導環境であるため、低温での熱負荷は常温 300 K の 150 倍に相当し、そのままで FCC-hh の放射光ロスの熱負荷は FCC-ee をも上回ることになる。したがって、FCC-hh では放射光をビームパイプから外に取り出し、できるだけ高温部で受け止める工夫がなされている。

通常の円形加速器ではビームは「パンチ」と呼ばれる小さな塊に分かれて加速・周回する。Table 1 でもう一つ気付くのは、FCC-hh と FCC-ee(Z) の蓄積パンチ数が同じ値になっている点である。これは決して偶然ではない。例えば FCC-hh の場合、パンチ当たりのルミノシティが高いと、一度のパンチ交差で生成される素粒子反応（イベント、event）数が増大し、検出器の処理能力を超えてしまう恐れがある。HL-LHC ではその数は 130 程度であり、FCC-hh では検出器の性能向上も見込んで 1000 としている。したがって、全蓄積電流が一定でも、パンチ数ができるだけ増やしてパンチ当たりのイベント数を減らしたいところである。パンチ間隔の最小値は加速する高周波 (RF) の周期であるが、FCC-hh では LHC と同様に 400 MHz であり、パンチ間隔の最小値は 2.5 ns である。FCC-ee の場合にはイベント数の問題は少ないものの、パンチ数が少ないとパンチ当たりの電荷量が大きくなり、ビーム不安定性を引き起こすので、やはり短いパンチ間隔が望ましい。しかし、実際にはこの最小間隔に達することを阻む、FCC-hh と FCC-ee に共通する問題が存在する。

その両者に共通する問題こそ、「電子雲」という正電荷を持ったビームにはほぼ必然的に付随する問題である。ビームによって散乱されたイオンや電子がビームパイプ内面に衝突すると二次電子が生成されるが、ビームが正電荷の場合、二次電子がビームの周囲にまとわりつく電子雲を形成する。この電子雲がビームの不安定性やビームパイプ表面での熱生成を引き起こす。パンチ間隔が短いほどこの電子雲の生成量が大きくなることが知られており、FCC-ee でも FCC-hh でもほぼ 20 ns 以下のパンチ間隔は困難である。これが FCC-ee(Z) と FCC-hh のパンチ数がほぼ等しくなる理由である。ちなみにこの電子雲による陽電子ビームの不安定性は KEK フォトンファクトリー (PF) および KEKBにおいて初めて実験的に確認されたものである^{10, 11)}。

3. FCC-ee の達成度と課題

どのような加速器計画でも必ずその前段階となる既存

の計画を踏まえて設計・建設されるものである。もし該当する加速器がなければ、規模を縮小したプロトタイプをまず試作して、本計画の詳細設計やリスク低減を図るものである。その点、円形衝突型加速器は1960年台から電子陽電子では約20、陽子（反陽子）でも約5の実機が稼働しており、充分な経験の蓄積があり、最もリスクの低い方式であろう。加速器の分野ではアイディアやミュレーションは提示されても、何ひとつプロトタイプもないような計画が往々にして提案されるが、そのような計画と円形衝突型加速器などの充分な実績のある計画を同列視することはできない。

ではまず、FCC-eeの場合、既存の計画に対してどれほどの飛躍を必要とするかを見てみよう。既存の加速器の性能に関しては例えれば文献9)を参照。Table 2はいくつかの性能指標において、FCC-eeがこれまでの他の加速器での達成値の何倍を目指しているか（Index of Improvement, IoI, 「向上度」）を列挙したものである。また、参考のため過去の加速器がそれぞれの指標でどれだけの向上度を達成したかも併記した。このTableを見ると、まずFCC-eeのルミノシティの向上度は極めて高いが、KEKBのコネル大学電子蓄積リング（CESR）に対する向上度の2倍程度であり、SuperKEKB（SKEKB）での向上度まで含めれば同程度である。それに比べて目を引くのはビーム蓄積エネルギーの圧倒的に高い向上度である。もちろんビーム蓄積エネルギーの値自体はTable 1にもあるように、FCC-hhやLHCに比べれば何桁も低い。しかしながら、電子陽電子コライダーではビーム寿命が（ビーム損失のうちルミノシティに比例する成分を除いても）10分程度と短く、ビーム損失率が高い。それらの失われたビームはリング内の最も有効径（アクセプタンス）の狭い場所に落ちるが、何もしなければそれは衝突点前後の最終収束電磁石である。そのままでは超伝導電磁石のクエンチなどを引き起こすので、

Table 2. Index of improvements (IoI) of main performance parameters for several e^+e^- colliders. IoI=(goal value)/(achieved values by previous machine). Parameters are for each beam. Luminosity is per interaction point (IP).

Item	Project	Goal/ achieved	Compared to	IoI
Beam energy	FCC-ee($t\bar{t}$)	182.5 GeV	LEP2	1.75
	LEP2	104 GeV	TRISTAN	3.25
Accel. voltage	FCC-ee($t\bar{t}$)	11.3 GV	LEP2	2.8
	FCC-ee(Z)	1.28 A	PEP-II(e^-)	0.43
Stored energy	FCC-ee(Z)	17.5 MJ	PEP-II(e^-)	87.5
	PEP-II(e^-)	0.2 MJ	PEP	20
Luminosity/IP	FCC-ee(Z)	1820/nb/s	SKEKB	38.7
	KEKB	21/nb/s	CESR	20
	SKEKB	47/nb/s	CESR	45

リング内の何ヶ所かに、アクセプタンスのより狭い装置（コリメータ）を設置してビームロスをそれらの場所に限定しなければならない。FCC-ee(Z)の場合、ビーム寿命10分では30 kWの熱が常時コリメータに落ちることになる。これは決して簡単に解決できる問題ではない。複数台のコリメータを設置するにしても、それらの間にうまく損失を分配する必要がある。

また、上記はビーム寿命から生ずる恒常的な損失であるが、ビームは往々にして不安定になり、突然わずか数周で全てのビームが失われるような事象がしばしば発生する。そのような現象は例えればSKEKBでも頻発し、その度にコリメータを破壊してきた¹²⁾。FCC-eeではB-ファクトリーの100倍にも及ぶビーム蓄積エネルギーがあるため、そのような非常時での装置の保護はいくつもの性能指標の向上の中でも最大級の課題であると言える。

4. FCC-hh の達成度と課題

一方、FCC-hhに目を向けると、FCC-hhはLHCの相似拡大版と理解して大きな間違いはなさそうである。そこで、Table 3にはLHC(HL-LHC)に比べたいいくつかの向上度(IoI)を載せた。

Table 3のIoIの中では目立つのはアーク部の単位長さ当たりのSR放射パワーであるが、これについては既に述べたように放射光ができるだけより高温部で受け止めることで対処する。ついで向上度が高いのはビーム蓄積エネルギーで、ビームエネルギーと周長の増大から必然的にもたらされるものではあるが、コリメータやビーム排出装置（ビームダンプ）にはLHCを桁で上回る精密な設計が必要である。この点、大きな放射光はビームエミッターンスの放射減衰を伴うので、ビームの収縮によるビームハローの低減が期待できるかもしれない。

Table 3でIoIが2以下で一見目立たないが、実は最も困難な課題が偏向電磁石の磁場である。FCC-hhではLHCと同様、円弧（アーク）部の大部分が超伝導電磁

Table 3. Index of improvements (IoI) of main performance parameters for FCC-hh, compared to LHC/HL-LHC. IoI=(goal value)/(achieved value by LHC/HL-LHC). Values are per beam.

Item	Goal	IoI
Circumference	91 km	3.4
Beam energy	50 TeV	~7
Main dipole field	16 T	1.9
Beam current	0.5 A	0.43
Stored beam energy	8.4 GJ	12
SR per unit length	28.4 W/m	86
Luminosity/IP	300/nb/s	~6
Event/crossing	1000	7.6

石で覆われる。その磁場を2倍近く強くするのは従来のNbTiの超伝導線では不可能で、Nb₃Snや高温超伝導体など、全く違った材料が必要である。実験室においてそのような磁場そのものを生成することは可能であるが、問題は約80kmにわたる偏向電磁石の製造コストであり、それがFCC-hh加速器の建設費の大部分を占める。幸いにもFCC-hhの建設開始まではまだ最低20年以上の時間があるので、その間にいかに高磁場・低コストの偏向電磁石が開発できるかがFCC-hhの最大の課題である。コストの到達目標としてはLHCの偏向電磁石と単位長さ当たりで同程度を当面の目安としている。仮にそのような電磁石が不可能で、LHCと同じ電磁石を使った場合は到達エネルギーは約半分になり、かつて頓挫したSSC計画と同等のエネルギーになるであろう。

5. まとめ

LEP/LHCに続く次世代の円形衝突型加速器計画について、主な性能目標と既存計画での達成値に比べた「向上度」について概説した。

文 献

- 1) Future Circular Collider Study Kickoff Meeting, Feb.

- 12–15 (2014), University of Geneva, <https://indico.cern.ch/event/282344/>
- 2) <https://fcc-cdr.web.cern.ch>
- 3) A. Abada, *et al.* [FCC] : *Eur. Phys. J. C* **79**, 474 (2019).
- 4) A. Abada, *et al.* [FCC] : *Eur. Phys. J. : Spec. Top.* **228**, 261 (2019).
- 5) A. Abada, *et al.* [FCC] : *Eur. Phys. J. : Spec. Top.* **228**, 755 (2019).
- 6) A. Abada, *et al.* [FCC] : *Eur. Phys. J. : Spec. Top.* **228**, 1109 (2019).
- 7) “Future Circular Collider Innovation Study”, <https://cordis.europa.eu/project/id/951754/results>
- 8) “FCC Week 2022”, May 30–June 3 (2022), Sorbonne Université, Paris, <https://indico.cern.ch/event/1064327/>
- 9) “High-Energy Collider Parameters”, Particle Data Group, https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/experimental_methods_and_colliders.html (2022).
- 10) M. Izawa, Y. Sato and T. Toyomasu : *Phys. Rev. Lett.* **74**, 5044 (1995).
- 11) K. Ohmi and F. Zimmermann : *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3821 (2000).
- 12) S. Terui, Y. Funakoshi, H. Hisamatsu, T. Ishibashi, K. Kanazawa, Y. Ohnishi, K. Shibata, M. Shirai, Y. Suetsugu and M. Tobiyama : JACoW IPAC2021, p. 3541 (2021), doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPA0359.