

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導（その1）

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

1. はじめに

1996年時点で約1万台の加速器が医療用、工業用、学術研究用として幅広く使われている（表1-1）。加速器の種類も円形加速器、直線加速器に分けられ、加速方式によってもいろいろあり、エネルギーもMeVからTeVの領域まで極めて幅がある。ここでは学術用にいわゆるエネルギーフロンティア（図1-1）として開発され、既に使われている、あるいはこれから使われようとしている高エネルギー超電導加速器にかぎって述べることにする。超電導が特に高エネルギー加速器（高エネルギー物理）と如何に密接な関係にあるかについて述べてみたい。

表 1-1 世界の加速器

1 GeV 以上の高エネルギー加速器	112
医学治療用	> 4000
生物研究用を含む医学研究用	~ 800
医療用アイソトープ生成用	~ 200
工業用	~ 1500
イオン注入用	> 2000
表面処理用	~ 1000
放射光用	~ 50

2. 加速器の歴史

2.1 高エネルギー加速器の技術開発

高エネルギー加速器が進歩するためのキーテクノロジーとして、高周波加速、同期加速の発明があった。粒子にエネルギーを与えて高いエネルギーを持つようにするには電界が必要であるが、それに高周波（マイクロ波）を使う技術を完成させたのは、1945-1947年にかけて当時バークレー研究所にいた L. Alvarez と W. Panofsky である。高周波で加速するためには、粒子の進行に同期して効率的に加速電界をかける必要がある。これがいわゆる同期加速の概念である。この技術が、線形加速器やシンクロトロンなどの円形加速器に応用された。

同期加速の概念を円形加速器として最初に展開したのはサイクロトロンである。

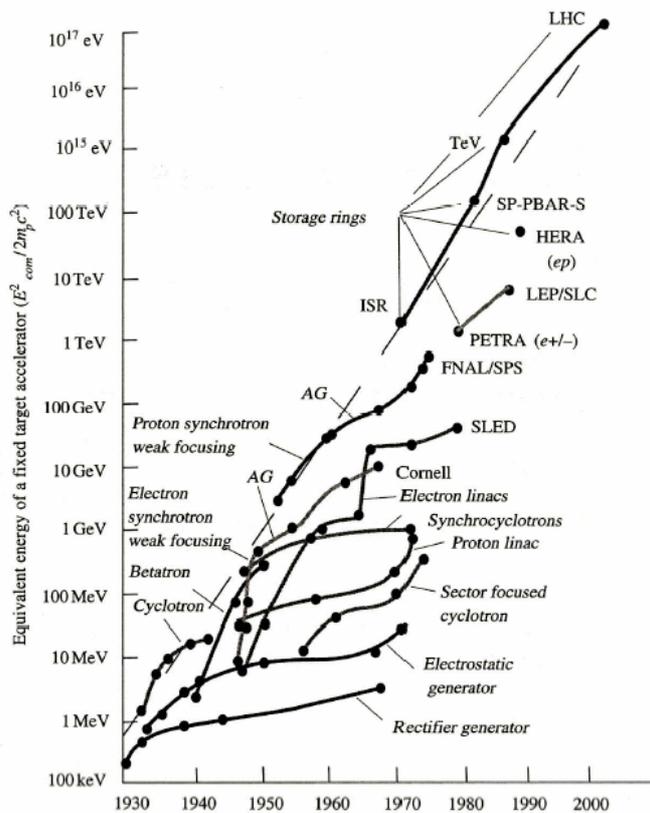


図 1-1 エネルギーフロンティアとして建設された高エネルギー加速器。LHC のコミッショニングは図よりも遅れて 2008 年春からと予定されている。サイクロトロンはエネルギーに限界があることが分かる。（AG: Alternating Gradient）

1930年 E. Lawrence 等が手のひらに乗る大きさのサイクロトロンを作り、陽子加速を行った。(図 2-1) Lawrence はサイクロトロンの発明とそれを使った原子核の研究でノーベル賞を受賞している。しかし、サイクロトロンでは粒子のエネルギーが高くなるに比例して軌道半径が大きくなるので、加速粒子のエネルギーを高くすると二乗で磁石がどんどん大きくなっていく。したがって、加速粒子のエネルギーに限界がある。

高エネルギー加速器の歴史は、円形加速器であるシンクロトロンの発明による。シンクロトロンは 1940 年代初期にイギリスで提案された。サイクロトロンは一定磁界であるのに対して、シンクロトロンでは粒子軌道半径が一定になるようにエネルギーに比例して電磁石の磁界を強くしてやる。そうすることで、一定軌道のところにのみ電磁石を置けばよいので、大幅に電磁石を小さくすることができる。この概念を使って、1952 年には 3 GeV の Cosmotron (BNL) が完成し、原子核実験に使われるようになった。その後、Bevatron (LBNL), Saturn (Saclay), Nimrod (Rutherford Lab.), ZGS (ANL) 等が次々と作られ、シンクロトロンは高エネルギー加速器として定着する。しかしながら、これ等のシンクロトロンはビームが発散しないように収束させる方式が弱収束型(ビームの広がりが大きい)であったため、サイクロトロンほどではないが巨大な電磁石が必要であった。



図 2-1 Lawrence が完成させたいかにも手作りという感じの手の平サイズの最初のサイクロトロン

画期的な発明は、E. Courant, M. Livingston, H. Snyder によって 1952 年に提案された強収束原理である。収束と発散作用のある電磁石を交互に並べることで、強い収束作用(ビームの広がりを小さくできる)を持つ加速器を作ることができることを証明した。この収束、発散を組み合わせる収束させるという理屈は、カメラのレンズにも一般に採用されているものである。この発明によって加速粒子のビーム径を大幅に小さくすることが可能となり、電磁石を極めてコンパクトにすることができるようになった。この原理を使って 1959 年に PS (CERN; Proton Synchrotron; 30 GeV) が、1960 年に AGS (BNL; Alternative Gradient Synchrotron; 33 GeV) が相次いで完成した。これによって、高エネルギー加速器の技術的な問題点が解決したと言える。ちなみに、これ等の加速器は現在でも現役で動いている。

## 2.2 International Conference on Magnet Technology

1965 年 9 月に、第 1 回 International Symposium on Magnet Technology が SLAC で開催された。参加者は 315 名、発表論文数は 90 編であった。最初は加速器用磁石技術を議論するシンポジウムとして開催されていたが、現在ではあらゆる分野の磁石技術を議論する場として最も活発に活動している国際会議の一つである。

論文集の序文に以下のように書いてある。

“New ideas in coil and core structure and improvements in insulation techniques have made magnets, which have been treated as one of the sensitive parts of a high-energy accelerator, now more of a reliable tool in high-energy accelerator applications.”

すなわち、現在では加速器だけでなく、電力、医療、核融合などのいろいろな分野での磁石技術を議論する国際会議が、最初は高エネルギー加速器用磁石について議論する場として始まった。当初はいわゆる常伝導磁石が主であったが、今では発表の大部分が超電導磁石技術である。ただ第1回の会議でも、論文集として

- Magnet technology and field analysis
- Magnet engineering
- Field measurement
- Superconducting and special purpose magnets
- Power supply engineering

に区分するとして、超電導磁石のセッションも設けられている。ただ論文集を見ると、このときに報告されているものは、検出器など実験に用いる超電導磁石に関するものであり、加速器用超電導磁石に関する報告はまだない。

## 出典

表 1-1 : W. Scharf & C. Chomicki, Physica Medica XII (4), 199, 1996 after G. Dearnaley, Nucl. Instr. Meth., B24/25, 506, 1987

図 1-1 : An Introduction to Particle Accelerators by E. Wilson, Oxford University Press, 2001

図 2-1 : Symmetry (A joint Fermilab/SLAC publication, vol. 4, August 2007) のカバーより

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その2)

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

3. 超電導加速器シンクロトロン

3.1 高エネルギー加速器と超電導

シンクロトロンでは、加速粒子は磁場によるローレンツ力と遠心力が平衡した軌道を通る。すなわち、加速粒子の運動量を  $p$  [GeV/c]、磁束密度を  $B$  [T]、軌道の曲率半径を  $\rho$  [m] とすると、次式を満たす軌道半径を周回する。

$$B\rho[T \cdot m] = 3.336 p [GeV/c]$$

完成間近の LHC のパラメータである  $B = 8.33$  [T]、 $\rho = 2804$  [m] を入れると、粒子の最大加速運動量として  $p = 7000$  [GeV/c] が得られる。入射運動量は  $450$  [GeV/c] であるので、 $B = 0.535$  [T] の磁束密度となる。加速に同期して  $0.535$  [T] から  $8.33$  [T] まで電磁石の磁場を上げていく。

式から分かるように、強い磁場を発生できる電磁石を用い、軌道半径の大きな加速器を作れば、高いエネルギーまで粒子を加速できる。だが、軌道半径を大きくするには長いトンネルを必要とし、比例して建設費が上がるので、強い磁場を発生できる超電導磁石を用いることになる。

常伝導磁石では、発生できる磁場は  $2$  T が限界である（実際には、鉄の飽和を考えると  $1.8$  T 程度）。如何にして強い磁場を発生できるかが高エネルギー加速器開発の鍵である。加速器用超電導磁石の開発は、1970 年代初め頃より世界の主だった研究所で開始されている。我が国でも KEK のトリスタン加速器用として  $5$  T 級の超電導磁石の開発が 1970 年代に行われている。アメリカでは、BNL が ISABELLE 計画を開始し、FNAL では Energy Saver (今の Tevatron) 計画<sup>注1)</sup> が提案され、夫々独自に超電導磁石の開発を手がけた。加速器用超電導磁石としては、FNAL が開発したカラーと呼ばれる非磁性鋼構造材による電磁力保持方式が技術的に優れており、結果的に ISABELLE 計画はキャンセルされ、Energy Saver 計画が生き残った。ただ、ISABELLE 計画の時に作られたインフラストラクチャは、現在の RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) に活用されている。基本的に FNAL で開発された超電導磁石の概念が、その後の超電導加速器に踏襲されている。

超電導磁石を用いるもう一つの利点は、省エネルギーであることである。超電導磁石を用いることによって数十分の一の電力ですむといわれている。運転経費の大幅な削減になる。LHC 加速器用超電導磁石の運転に要する平均電力は  $23$  MVA である。これを常伝導磁石で作れば、その運転には数十倍の電力が必要になると考えられている。原子力発電所が必要な電力である。

3.2 これまでの超電導シンクロトロン

3.1 で述べたように、限られた敷地で高いエネルギーまで加速するためには高磁場が必要である。そのためには、超電導磁石が必須である。今までに完成あるいは計画された高エネルギー超電導シンクロトロンの一覧を表 3-1 に示す。

高エネルギー加速器用超電導磁石の基本技術は Tevatron によって完成されたが、夫々の超電導シンクロトロンに用いられている共通技術は以下の通りである。

- ・  $10$  kA 級の大電流を流すことができ、機械的に堅固なラザフォード・ケーブルを用いる。

- ・ 加速器に要求される高い磁場精度を得るために、電流分布が  $\cos\theta$  (双極電磁石) 近似になるようなコイルの導体配置にする。
- ・ 導体の動きを抑え、安定な電磁石とするために、カラーと呼ばれる非磁性鋼を用いて電磁力を支える。

表 3-1 高エネルギー超電導シンクロトロンのパラメータ

加速器名		Tevatron	HERA	RHIC	LHC	SSC***	
研究所(国)		FNAL(米)	DESY(独)	BNL(米)	CERN(スイ)	SSCL(米)	
粒子エネルギー	[TeV]	0.9	0.82	0.1/amu*	7	20	
加速器周長	[km]	6.3	6.3	3.8	26.7	87.1	
加速器数		1	1	1	2	2	
主二極磁石	磁界	[T]	4.4	4.7	3.5	8.3	6.6
	長さ	[m]	6.1	8.8	9.7	14.2	15.8/13.3
	個数		774	416	288	1232**	7956/504
主四極磁石	コイル内径	[cm]	7.5	7.5	8	5.6	5
	磁場勾配	[T/m]	76	91	72	223	205
	長さ	[m]	1.7	1.5~1.9	1.1	3.1	5.9/7.7
	個数		216	256	276	386**	1664/72
超電導体		Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	
冷却温度		4.5	4.5	4.5	1.9	4.4	
完成年度		1985	1990****	1998	2008	中止	

\* 核子当りのエネルギー

\*\* 1台のヨークに2個のコイルの入った two-in-one 型

\*\*\* 計画は中止されたが、超電導磁石技術開発に貢献があった。

\*\*\*\* 2007年に運転停止

図 3-1 に実物の超電導磁石のカットアウト写真を示す。



図 3-1 加速器用超電導磁石の例 (SSC 双極電磁石)

超電導双極電磁石の断面比較図を図 3-2 に示す。

開発に際して、(1) Tevatron は、開発研究から製作・組立全部を FNAL で行った。(2) HERA のマグネットは企業で製作された最初の量産である。(3) SSC は計画が中止になったが、導体開発や安定性などに関する技術開発研究は、LHC の磁石開発に影響を与えた。(4) LHC では、企業での量産効果を見ることができた。

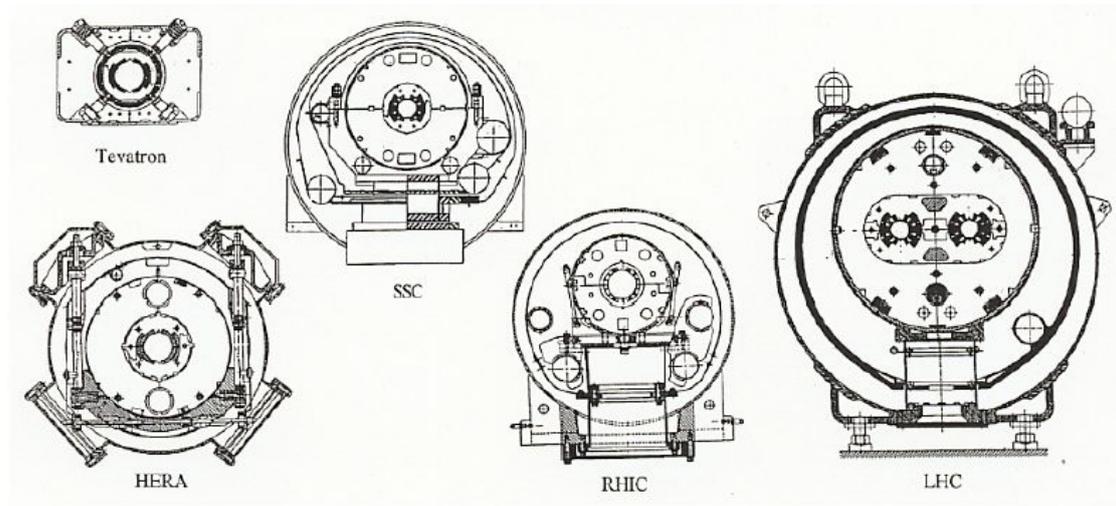


図 3-2 これまでの高エネルギー超電導加速器の超電導磁石の断面比較 (同一縮尺)

夫々の計画における超電導技術の特徴を述べると、

- (1)Tevatron は鉄ヨークが室温である。コイルと鉄ヨークとの間隔が短いので、断熱支持方法に工夫をしているが、入熱量は大きい。
- (2)HERA のマグネット以降に製作された超電導磁石は鉄ヨークも低温に冷却する方式である。コールドマスは増えるが、真空容器の設計に自由度がある。また、鉄ヨークを電磁力支持材に併用できるので、より強固な支持が可能となり、鉄ヨークの磁場への寄与がある。
- (3)RHIC のコイルは、磁場が低いので単層コイルである。また、プラスチック・カラーを用いることで、対地絶縁を確保し、製作法を簡素化している。
- (4)コールドマスの支持方法は、HERA が吊り下げ方式で、他は下から同心円状の FRP 断熱支持材で支持している。
- (5)SSC では、内コイルと外コイルで異なるケーブルを用い (グレーディング)、材料費を節約した。
- (6)LHC の電磁石は、1 ヨークに 2 つのコイルが組み込まれている。これは、トンネル断面の制限による。また、8.3 T と Nb-Ti の限界に近い磁場を要求しているので、1.9 K の He II を用いて冷却する。

これまでの計画遂行において以上のような特徴があるが、どの計画においても、R&D は研究所主体で行われ、それで開発された技術を企業に移転して生産を行っているところに大きな特長がある。最先端技術を必要とするので、計画を遂行する側が技術保証に責任を持つことである。

注 1) その頃、高エネルギー物理の管轄が DOE になり、その関係からか Energy Saver 計画と呼ばれていた。最終的に、加速粒子のエネルギーが 1 TeV になることから、Tevatron と名付けられた。  
出典

図 3-1 : SSC パンフレット “To the Heart of Matter – The Superconducting Super Collider”.

図 3-2 : N.N. Wilson, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 9, pp. 111-121, 1999.

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その3)

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

4. シンクロトロン用超電導磁石の特徴と製作技術

高エネルギー加速器では安定にビームを加速するために最先端の高度技術が結集される。したがって、超電導磁石技術においても最先端のものが要求される。ここでは、技術的なことを中心に特徴を述べる。

高エネルギー加速器用超電導磁石の特徴は

- 1) 磁場均一度の誤差が  $10^{-4}$  より小さいこと
- 2) 高磁場であること
- 3) コイルの平均電流密度が  $500 \text{ A/mm}^2$  程度と高いこと
- 4) 定格運転電流が臨界電流の 85 %程度であること
- 5) 定格通電までトレーニングクエンチがないこと
- 6) 量産できるように作りやすい形状、構造であること

などである。

4.1 磁場精度と工作精度

シンクロトロンは、原理的に加速粒子を曲げて一定軌道上に保持する二極電磁石（偏曲電磁石）と粒子が軌道上から外れない（発散しない）ように収束させる四極電磁石（収束電磁石）の組合せになる。粒子が同じ軌道上を何万回と周回するために、磁場のわずかな誤差によるローレンツ力が粒子を安定軌道上から発散させる。これは、ブランコを揺るときにわずかな力であっても、振幅がましていくのに似ている。このために、加速器として成り立つためには、磁場均一度（二極電磁石では磁場の一様性、四極電磁石では磁場勾配 ( $dB/dx$ ) の一様性) が最も厳しく要求される。そのための誤差の目安が  $10^{-4}$  以下である。超電導磁石のコイル内径（アパーチャ）で、中心からだいたい 60 %ほどの空間が粒子の通るところであるので、その空間の磁場誤差が要求を満たすように設計、製作する。

これらの均一磁場を作り出す方法は幾つか考えられる（図 4-1）。現在採用されている

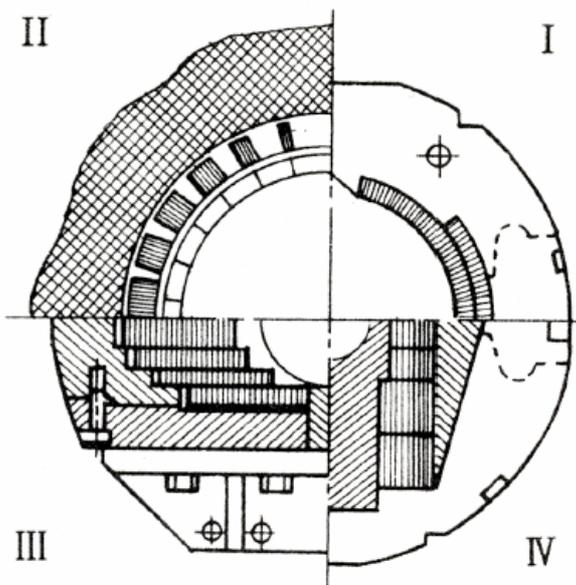


図 4-1 超電導双極磁石のコイル配置例。  
I および II が COS ⊙配置

方法は、COS  $\theta$ 配置と呼ばれているものである。図 4-2 の左に示す楕円交差型の電流分布を仮定すると、空間内に作られる磁場は、二極電磁石 (COS  $\theta$ 配置) に対しては均一磁場、四極電磁石 (COS  $2\theta$ 配置) に対しては均一磁場勾配になり、理想的な磁場分布が得られる。実際には加工上そのような配置の巻線は不可能なので、COS  $\theta$ 分布を近似した右図のような配置にする。この方法は仕様導体量、製作のしやすさからメリットがある。

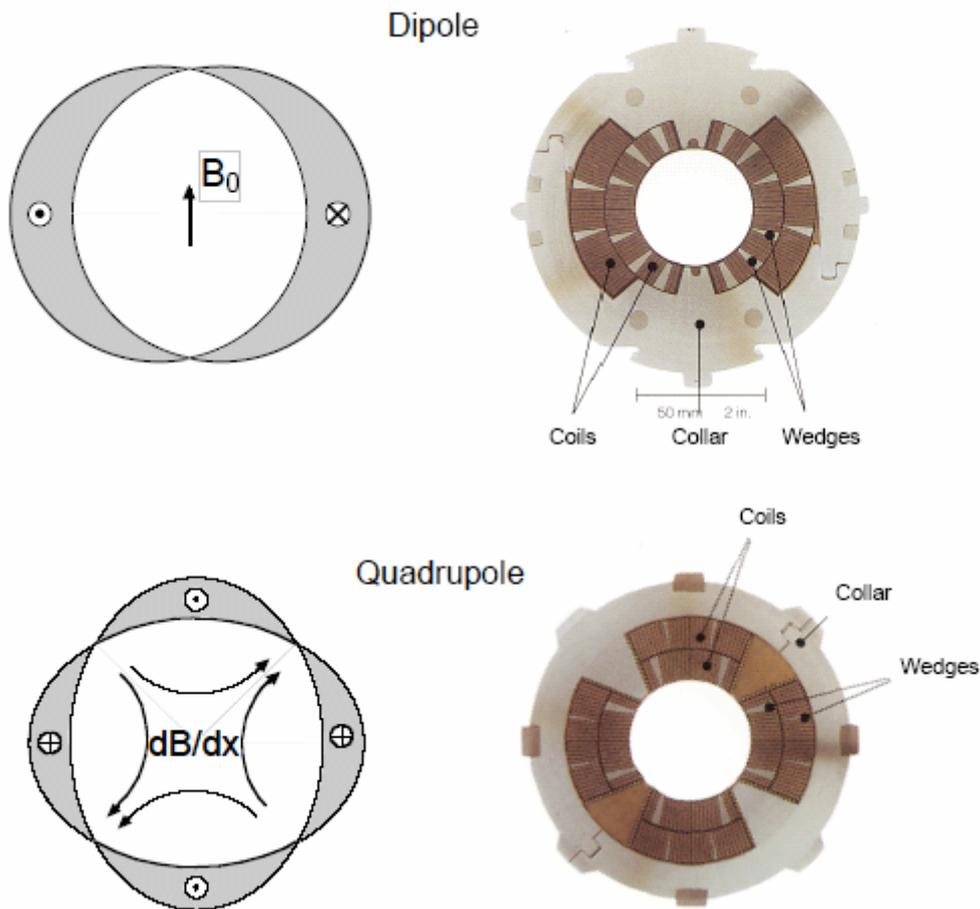


図 4-2 加速器用超伝導コイル配置。理想的には COS  $\theta$ 配置 (左図) がよいが、製作上近似した配置 (右図、SSC の例) になる。

このような高精度の磁場均一度は、寸法精度の高い素線とそれを用いた高品質のラザフォード・ケーブルの開発や高度のコイル製作技術によって得られた。コイル巻き線から最終仕上がりに対しても、 $\pm 20 \mu\text{m}$  以下を目安に加工される。Tevatron の時に開発された板厚数 mm のステンレス鋼を、打ち抜き加工で作るカラーと呼ばれるコイル支持構造材を用いる技術によって、この誤差内に抑えることが可能になった。特に、ケーブルの仕上り誤差が強く影響するので、ケーブル厚みの誤差が数  $\mu\text{m}$  に入るように製造管理される。

LHC では、二極電磁石だけで 1 千台の磁石を製作 (3 メーカーに発注し、各メーカーが 400 台余りの磁石を製作) したので習熟効果が現れ、製作最終段階では最初の 1/3 程度の製作時間に短縮された。

## 4.2 導体の開発

加速器が要求する磁場を発生するためには、導体性能がものをいう。加速器用超電導コイルは、図 3-2 (3 月号) に示すように、コンパクトである。Nb<sub>3</sub>Sn のような導体を用いた高磁場を発生できるコイルの開発研究も活発に行われているが、現在のところ実用に供されている加速器用超電導磁石の導体材料としては唯一 Nb-Ti である。

Nb-Ti の臨界電流特性の進歩を見ると図 4-3 に示すように、コンスタントに進歩しているのではなく、プロジェクトが進められるときに、それが要求する性能に従ってステップ状に改良されていることが分かる。すなわち、プロジェクトの要求が進歩の原動力になっている。

導体形状としては、数 kA ~ 10 kA 程度の電流を流すこと、できるだけコイルの平均電流密度を高くしたいこと、電磁力を押しさえ込みやすい構造であることなどから、素線数 30 ~ 40 本のラザフォード・ケーブルが用いられる。素線としては、フィラメント径が 5 μm 程度 (細ければ細いほどよいが、線加工技術が難しくなり、高価になる) 銅比が 2 以下である。素線の寸法誤差では、約 1 mm の素線径に対して 2 ~ 3 μm、ケーブルの寸法精度は約 1.5 mm 厚みにたいして 6 μm 程度の誤差内に納めることが要求される。できるだけ断面形状をコンパクトにし、高い磁場を発生できるよう、コイルの平均電流密度が大体 500 A/mm<sup>2</sup> である。また、変動磁場でケーブル素線間に流れる誘導電流によって、磁場精度が悪くなったり、安定性に影響したりするので、素線間接触抵抗を最適な値に制御することも行われている。

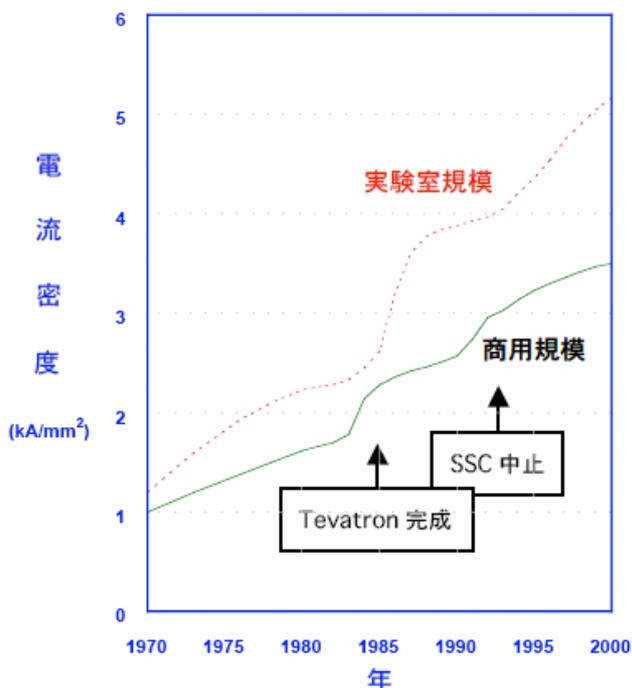


図 4-3 Nb-Ti 線の臨界電流特性進歩の歴史。1983 年頃の進歩は Tevatron 計画、1990 年頃の進歩は SSC 計画が進められたときである。

## 出典

図 4-1 : 超伝導・低温工学ハンドブック、822 頁、(社)低温工学協会編、オーム社、1993

図 4-2 : SSC パンフレット “To the Heart of Matter – The Superconducting Super Collider”

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その4)

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

4.3 クエンチとヒステリシス

高エネルギー加速器用超電導磁石と通常の電磁石との主な違いは、超電導評価においてクエンチすることと励減時にヒステリシスがあることである。

コイルの高い平均電流密度にかかわらず、負荷曲線上の臨界電流値の 85 %程度で運転される。しかし、加速器を構成する超電導磁石の個数が 1000 台にもなるため、定格電流値までクエンチをしないものが要求される。受け入れ試験を行い、多くても 1 ないし 2 回のクエンチで定格に達するものを合格とする。そのため、カラーでプリストレスをかけて導体の動きを抑え、クエンチしないようにする。トンネル内に設置する前に、クエンチ特性の試験をし、同時に磁場測定も実施する。一例として LHC 二極電磁石のクエンチ特性を図 4-4 に示す。定格磁場まで 2 回以下のクエンチ回数であるものを合格とする。

素線の銅比が小さいので、ホットスポットができないようにマグネット全体を常伝導状態にして保護する。MIT を計算し、ホットスポット温度が 400 K 以下になるように設計する。幸い常伝導伝播速度が速いので均一温度上昇しやすいが、必要に応じて保護ヒータをコイルに抱かせる。

素線のヒステリシスがあるために励減時にヒステリシスを生じる。図 4-5 に素線のヒステリシスによって生じる 6 極および 10 極磁場成分の励磁電流依存性を示す。これはフィラメントへの磁束侵入 (磁化) のヒステリシスに起因する。フィラメントの磁化の大きさは、外部磁場によらず一定であるので、多極磁場成分のヒステリシスの影響は磁場が高くなると相対的に小さく、磁場の低いところで大きくなり、影響が顕著になる。したがって、加速粒子の入射時に影響がある。

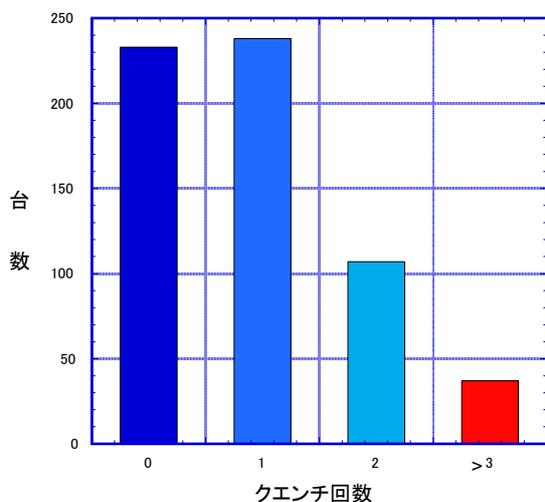


図 4-4 LHC 二極電磁石の定格磁場 (8.33 T) までのクエンチ回数の分布

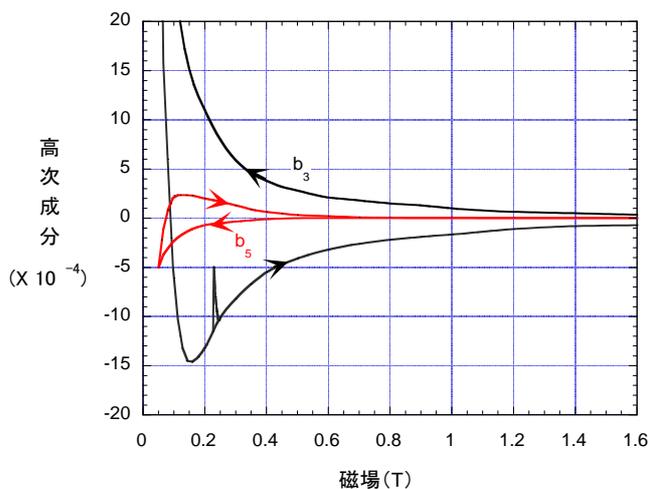


図 4-5 超電導偏極磁石の多極磁場成分 (6 極および 10 極) のヒステリシスの例。例えば、0.25 T での  $b_3$  の振舞いは素線間に誘起された電流変化によるスナップバックである。

#### 4.4 スナップバックと交流損失

変動磁界によるラザフォードケーブルの素線間に誘起される誘導電流の変化によって、高磁場成分の時間変動が起こる。前節で述べたように、電磁石の電流を変えることによって多極成分のヒステリシスが生じるが、電流変化を止めて一定電流にしておくと（例えば入射磁場）、素線間誘導電流の減衰によって多極成分の大きさが時間とともに変化する。加速のために電流を上げていくと、元の値に戻る（図 4-5 の 0.25 T 近傍に現れている現象）。この現象はスナップバックと呼ばれ、HERA で観測され、原因が明らかにされた。

素線間の誘導電流により交流損失が発生する。SSC では、励磁速度を変えたときのクエンチ電流の振る舞いが 2 種類分類できることが分かった。図 4-6 に示すグラフ a<sub>1</sub> は交流損失による劣化であり、グラフ b<sub>1</sub> は素線間誘導電流に起因することが明らかにされている。これらの研究から、安定性と交流損失の双方を解決する方法として、素線間接触抵抗を適当な値に制御する方法が LHC のマグネットで開発されている。

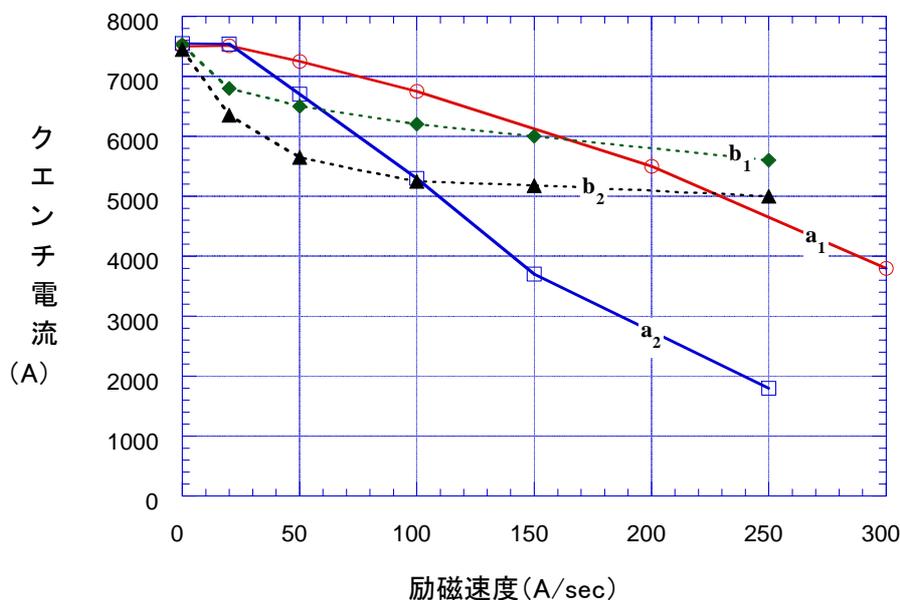


図 4-6 SSC 超電導双極電磁石のクエンチ電流の励磁速度依存性。a<sub>1</sub> および a<sub>2</sub> が交流損失に起因するもの、b<sub>1</sub> および b<sub>2</sub> が素線間にながれる誘導電流に起因するものである。

#### 4.5 放射光

荷電粒子が磁場中で曲げられると接線方向に光を放射する。これを放射光と呼び、物性研究などに使われている。放射光によって損失するエネルギーは

$$\text{放射光による損失エネルギー} \propto \frac{1}{(m_0 c^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

で与えられる。ここで、 $m_0$  は粒子の静止質量、 $E$  は粒子のエネルギー、 $\rho$  は粒子軌道の曲率半径である。

電子シンクロトロンでは、エネルギーが GeV オーダーになると放射光による損失が問題になる。一方、陽子シンクロトロンでは静止質量が大きい通常は問題にならないが、LHC 程度のエネルギーになると放射光の発生が問題になってくる。すなわち、放射光によって真空ビームパイプの内

壁から電子やイオンがたたき出されて真空度が悪化する、放射光による損失がそのまま冷凍機の熱負荷になるなどである。ちなみに LHC では、粒子エネルギーが 7 TeV の時に放射光損失が 3.9 kW/beam、換言すると 0.22 W/m/beam になる。超電導磁石の温度上昇をもたらすだけでなく、冷凍機熱負荷としてもバカにならない。

#### 4.6 冷凍機

冷凍機は高エネルギー超電導加速器にとって要である。高エネルギー超電導加速器は、周長が数 km 以上になるので、加速器をセクションに分け、各セクションに冷凍システムを設置し、冷却する。セクションの分け方は、夫々の設計によるが、Tevatron の場合、周長 6 km にわたって 24 サブステーションがあり、比較的小型の冷凍機で冷却される。各サブステーションには、中央液化冷凍機から液が供給される。HERA では、6 km を 2 セクションに分け、3 台の大型冷凍機で冷却する。冷凍能力は 2 台で十分になるよう設計されており、1 台は予備であると同時に初期冷却の時には 3 台を稼働させる。LHC では、周長 27 km を 8 セクションに分け、8 台の大型冷凍機で、液体ヘリウム II を発生して冷却する。1 台の冷凍機が分担する長さは 3.3 km である。夫々の冷凍機の比較を表 4-1 に示す。

表 4-1 高エネルギー加速器に用いられている大型冷凍機

装置名称	Tevatron	HERA	RHIC	LHC
研究所	FNAL	DESY	BNL	CERN
加速器周長	6.3 km	6.3 km	3.8 km	26.7 km
液化冷凍能力	中央液化機 4.9 kℓ/h @ 4.6 K サテライト冷凍機 23 kW/24 台	6.8 kW @ 4.4 K 20.5 g/s @ 4.4 K 20 kW @ 80 K	25 kW max @ 5.5 K 55 kW @ 50 K	18 kW @ 4.2 K 相当/ 台
台数	1	3	1	8
冷却重量	600 トン	3,900 トン	1,080 トン	37,000 トン
消費動力	3,000 kW	2,800 kW	17,400 kW	40,000 kW 総計
納入年	1980	1987	1986	~2004
備考	24 台のサテライト冷凍機が付属	2 台で冷却可能 1 台は予備	ISEBELLE 計画のものを改修	加圧 HeII 冷却

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その5)

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

5.1 LHC

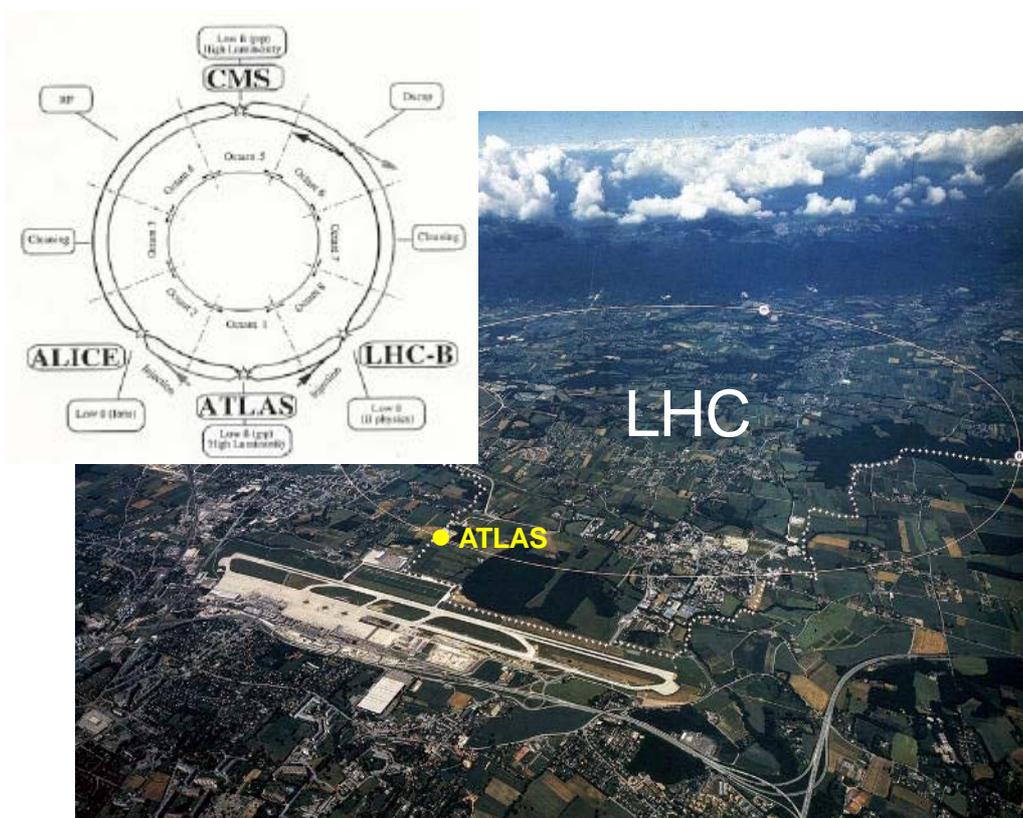


図 5-1 LHC の構成模式図。8 回対称になっており、4 ヶ所の衝突点で実験が行われる。ATLAS には KEK 他日本の実験グループが参加している。

LHC では陽子を 7 兆電子ボルトのエネルギーまで加速し、ヒッグス粒子の探索などビッグバン宇宙の誕生直後など素粒子物理の研究を行う。周長 27 km の地下トンネル内に 1,232 台の主超電導双極電磁石と 386 台の主超電導四極電磁石、4 ヶ所のビーム衝突点に 32 台の強収束超電導四極電磁石などを設置する (図 5-1、5-2)。補正磁石を加えると総数 6,000 台を越える超電導磁石群は 1.9 K まで冷やされ、Nb-Ti では限界の 8 T を越える磁場を発生する。

1980 年頃から SSC と LHC 計画が相次いで出されたが、SSC 計画は 1989 年からテキサス州で建設が始まったものの、87 km の加速器トンネルの 3 割を掘り進んだ時点で、財政難のため 1993 年に中止された。計画頓挫の理由は、大幅な予算超過のほかに、international project にならなかったこと、研究所の上層部が軍関係者で占められていたことなどと言われている。しかし、超電導技術の観点からは、いろいろな貢献をしている (本稿 7 月号)。

SSC の中止を受けて、LHC 計画の実現への機運が全世界的に高まり、1994 年末の CERN 理事会

で建設が正式に承認された。その後、日本・米国・カナダ・ロシアなどからのプロジェクト参加があいつぎ、現在では全世界的なプロジェクトとなっている。総工費は 3,500 億円であり、超電導、低温機器が大きな比率を占めている。



図 5-2 トンネル内に設置された超電導磁石群。(CERN 提供)

## 5.2 LHC に使われる低温・超電導技術

LHC の主要な超電導磁石のパラメータを表 5-1 に示す。加速器の最小構成単位であるハーフセルは、3 台の主双極電磁石と 1 台の主四極電磁石で構成され、全長 53.2 m である。ハーフセル 1 対で 1 セルになるが、これが冷却の最小単位になる。Octant (1/8 周) は 24 セルで構成される。

表 5-1 LHC の主要な超電導磁石のパラメータ

		主双極電磁石	主四極電磁石	強収束四極電磁石 (KEK 設計)
定格磁場 ; 定格磁場勾配	[T;T/m]	8.36	223	215
コイル最大磁場	[T]	8.7	6.87	8.63
冷却温度	[K]	1.9	1.9	1.9
定格電流	[A]	11,470	11,750	7,119
実効磁場長	[m]	14.2	3.1	6.3
コイル電流密度 (内)/(外)	[A/mm <sup>2</sup> ]	405/520	464/464	440/487
コイル内径	[mm]	56	56	70
ヨーク外径	[mm]	540	444	470
貯蔵エネルギー	[kJ/m]	274×2	127×2	350
磁石構成		two-in-one	two-in-one	単口径
個数	台	1232	386	16

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

CERN で開発された主双極電磁石 (図 5-3) は、欧州企業 3 社に発注され、製作された。1~3 回のクエンチで 8.3 T の定格値を越えたものを合格とする。また、主四極電磁石は、Saclay 研究所 (仏) と共同で開発され、欧州の会社が製作した。

補正電磁石を含めた電磁石群には、13 kA、6 kA、0.6 kA の 3 種類、総数 1,070 本の HTS 電流リードが使用されている。

電磁石の総冷却重量は 37,000 トンになる。8 台の冷凍機 (1 台当り 18 kW @ 4.5 K 相当) を用い、Octant (3.3 km) 毎に冷却する。基本冷却ユニットのフローを図 5-4 に示す。効率よく He II を発生するため、合計 8 ユニットの低温圧縮機 (2.4 kW @ 1.8 K) が使われる。トンネルに設置された磁石は、Octant 毎に冷却、励磁試験をしている。

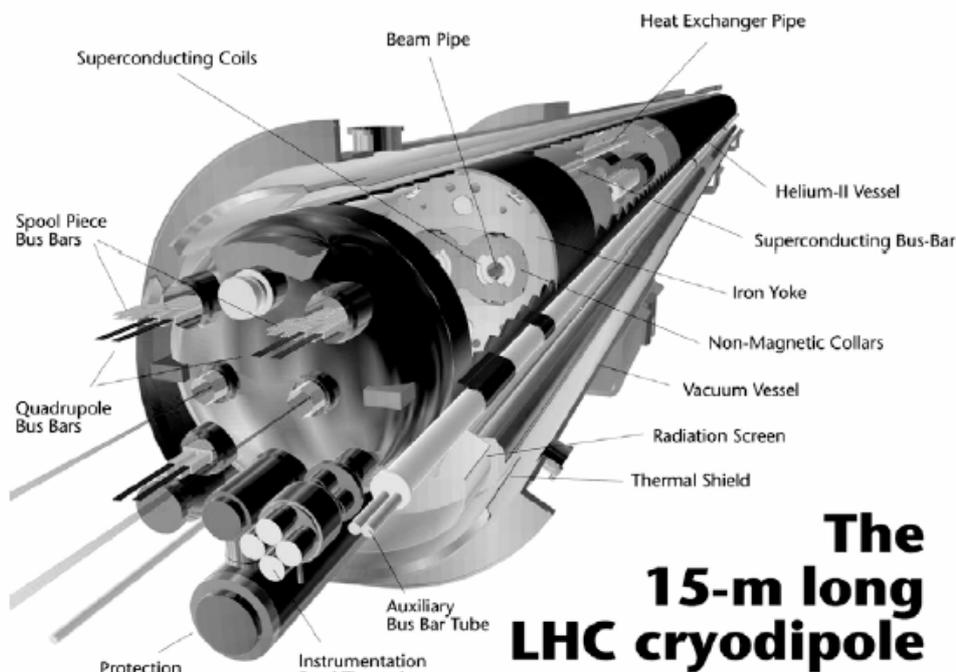


図 5-3 LHC 主超電導双極電磁石

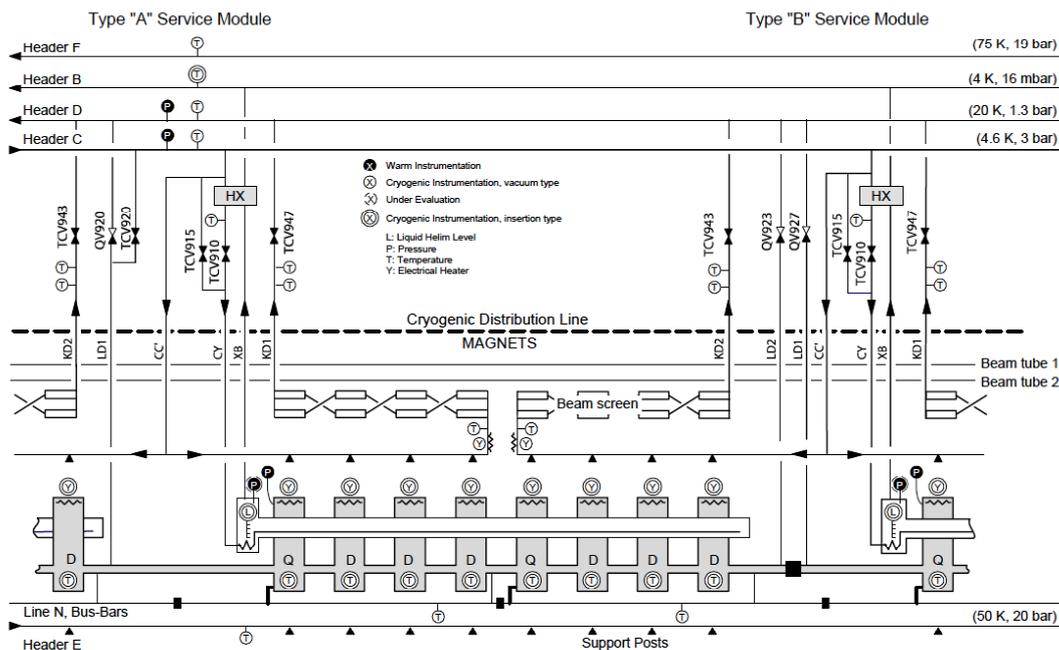


図 5-4 LHC の基本冷却ユニットのフロー D: 主双極電磁石、Q: 主四極電磁石

### 5.3 我国の LHC への取り組み

我国は、1995年6月に当時の与謝野文部大臣が CERN 理事会に出席し、建設協力を表明した。これにより日本企業の応札も可能となり、最終的に受注総額は日本政府の総出資額を越える規模になった。日本以外の国が担当する実験装置の部品を受注するケースもあり、日本企業がもつ技術力と品質の良さを示している。以下に、超電導・低温機器関係での我国の寄与について述べる。

#### 5.3.1 強収束超伝導四極電磁石

超電導電磁石のなかで最も条件の厳しいものが、衝突点最近傍の強収束四極電磁石である。合計 32 台の電磁石を KEK と FNAL が分担し、各々 16 台ずつ製作した。表 5-1 に示すように、高磁場勾配、大口径のため最大経験磁束密度が $\sim 9\text{T}$ 、散乱ビームによる加熱などの厳しい条件で運転される。高磁場精度を得るため、コイル、カラー、ヨークなどの各部の寸法精度を $\pm 25\ \mu\text{m}$ 以下に管理する。磁場精度に影響するケーブルの寸法管理も厳重に行われた。1995年から KEK が開発を行い、その結果を東芝へ技術移転し、スケジュール通りに製作、納入された。クライオスタットへの組み込みは FNAL が担当した。

#### 5.3.2 超電導線

LHC では大量の Nb-Ti 超電導線を使用する。主双極電磁石の内コイル用の超電導ケーブルは約 500 トン、外コイル用(同じものが主四極電磁石にも使われる)が約 700 トンになる。古河電工が外コイル用超電導ケーブルの 1/8 余を受注、製造した。電磁石の磁場精度や安定性のため、厳しい規格が要求される。例えば、厚みでは  $1.480 \pm 0.006\ \text{mm}$  の精度に管理され、それ以外にも、フィラメント径、磁化率、銅比など従来にない厳しい仕様が要求された。高い品質によって、古河電工は LHC Golden Hadron Award を受賞した。

#### 5.3.3 低温ヘリウム圧縮機

LHC の膨大な冷却重量を 1.9 K、1 気圧の加圧 He II を用いて効率よく冷却するために、8 ユニットの低温圧縮機(1 台当りの He 流量が 125 g/s)が使われる。プロトタイプによる性能試験評価の結果、高効率の低温圧縮機(図 5-5)を開発した IHI が半分の 4 台のユニットを受注し、納入した。IHI はその優れた性能から同じく LHC Golden Hadron Award を受賞している。



図 5-5 LHC 用に IHI で開発された低温圧縮機 (IHI 提供)

#### 参考文献

近藤敬比古、新富孝和、木村嘉孝、「CERN-LHC への日本の協力」、低温工学、vol. 36 (2001) pp. 562-575.

山本明、「CERN との国際協力-LHC 加速器超伝導磁石の開発協力-」、加速器、vol. 2 (2005) pp. 263-269.

LHC Design Report, CERN 2004-003-v1, "The LHC Main Ring," 2004.

「小特集：LHC 実験が始まる」、日本物理学会誌、vol. 62, no. 12 (2007).

【隔月連載記事】

粒子加速器と超電導 (その6)

日本大学  
大学院総合科学研究科  
教授 新富孝和

Linear Collider 計画

6.1 Linear Collider 目的

2008年9月10日にLHCにおいて最初のビームを周回させることに成功した。この加速器の最大の狙いは、標準理論で予言され質量の根源となるヒッグス粒子の発見である。LHCは陽子（ハドロン）同士を衝突させて新しい現象を見つけ出す装置であるが、クォークで構成されるハドロン同士の衝突のため非常に沢山の事象が発現し、ヒッグス粒子の性質を精密に測定することが困難である。それに比べて電子・陽電子（レプトン）の衝突では、現象が単純で、狙った粒子の精密測定が可能となる。これによって、ヒッグス粒子の精密測定のみならず標準理論を越える超対称性理論の検証ができると予測されている。それによって、宇宙創世いわゆるビッグバンの状態により近づくことになり、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用と重力が一つになっていた手掛りが得られるものと期待されている。International Linear Collider (ILC) は、LHCと相補的な関係にあり、人類最大の興味の一つである物質の根源を見つけ出すという壮大な計画である。

6.2 何故 Linear Collider か

荷電粒子を加速すると放射光が出ることは4章で述べた(7月号参照)。すなわち、磁界中を荷電粒子が走るとき Lorentz 力によって加速度を受け、接線方向に放射光を出す。その損失エネルギーは、粒子の質量が軽く、エネルギーが高いほど大きくなる。これまでの最大の電子シンクロトロンは、CERNのLEP (Large Electron Positron Collider) で、電子(陽電子)のエネルギーは約100 GeVであった。しかし、放射光によるエネルギー損失のために、これ以上のエネルギーに加速するのは実際上不可能である。そこで、放射光損失のない直線加速器 (Linear Collider) が次世代のエネルギー・フロンティアの加速器として検討されてきた。

6.3 計画の概要

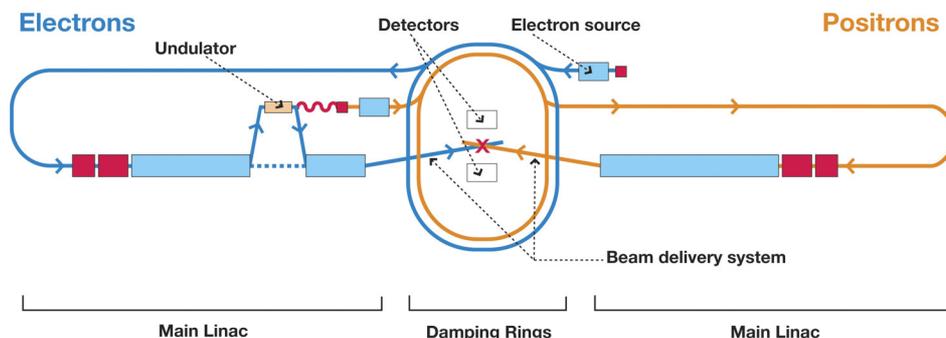


図 6-1 ILC の概略構成図。電子と陽電子を超電導加速空洞で加速して正面衝突させる。

2004年8月ICFA (International Committee for Future Accelerators) は、国際協力により重心系エネルギーで500 GeV~1 TeVのILCを建設することを了承した。計画実現に向けて、国際的な機関が設計研究、開発研究を精力的に進めている。建設地はどこになるかはまだ決まっていない。加速方式では超電導か常電導かの選択があるが、高い電力効率、大きな設置位置許容誤差、高い加速勾配の見通しなどの理由から、超電導加速空洞方式によることが決定した。全長で30 km余りにもなる加速器をできるだけコンパクトで、かつ少ない運転電力にするためには超電導が必要な技術としてとらえられた。ILCの概略構成図ならびに設置概念図を図6-1、6-2に示す。

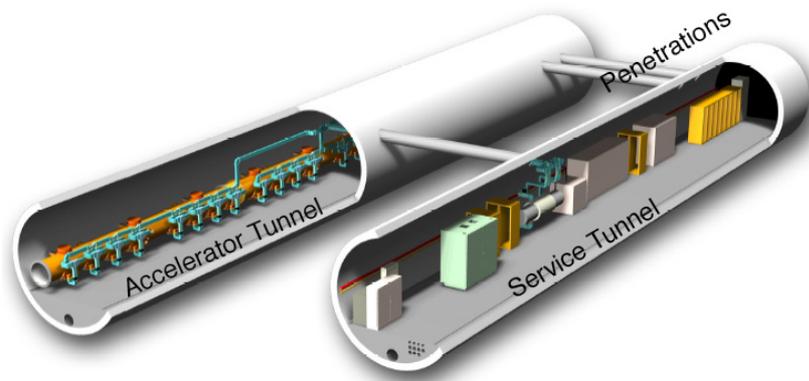


図6-2 LHCの設置概念図。加速トンネルに加速空洞本体が据え付けられ、サービストンネルに高周波電源が設置される。

## 6.4 必要な超電導技術

### a) 加速空洞

現在、日・米・欧の研究所で高性能加速空洞の開発が進められている。開発では、まず単セル空洞の性能試験を行う。実機では9セルを連ねたものが使われるので(図6-3)、最終的には9セルでの性能が問題となる。空洞の共振周波数は1.3 GHzである。建設コストを抑えるために可能な限り高い加速勾配とする必要があり、ILCの目標は9セルの実機において35 MV/m(定格運転では31.5 MV/m)、Q値 $0.8 \times 10^{10}$ 以上である。空洞の材料には高純度Nb ( $RRR \geq 300$ )が使われる。9セルの加速空洞9台を12 m長のクライオスタット(クライオモジュール)に収納し、2 Kの飽和超流動Heで冷却する。全体で約1900台のクライオモジュールが必要となる。



図6-3 9セルのNb超電導加速空洞。これが基本ユニットになる。

開発された 9 セルの高性能加速空洞の試験結果を図 6-4 に示す。目標である 35 MV/m の加速勾配 ( $E_{acc}$ ) を越え、40 MV/m が得られている。KEK での単セルの性能試験では 52 MV/m が得られている。超電導空洞の場合、空洞表面磁界が臨界値を越える点が限界となるが、2 K 温度での加速勾配の理論限界は 50 MV/m 程度といわれており、最高性能の空洞は理論限界値に達していると考えられている。

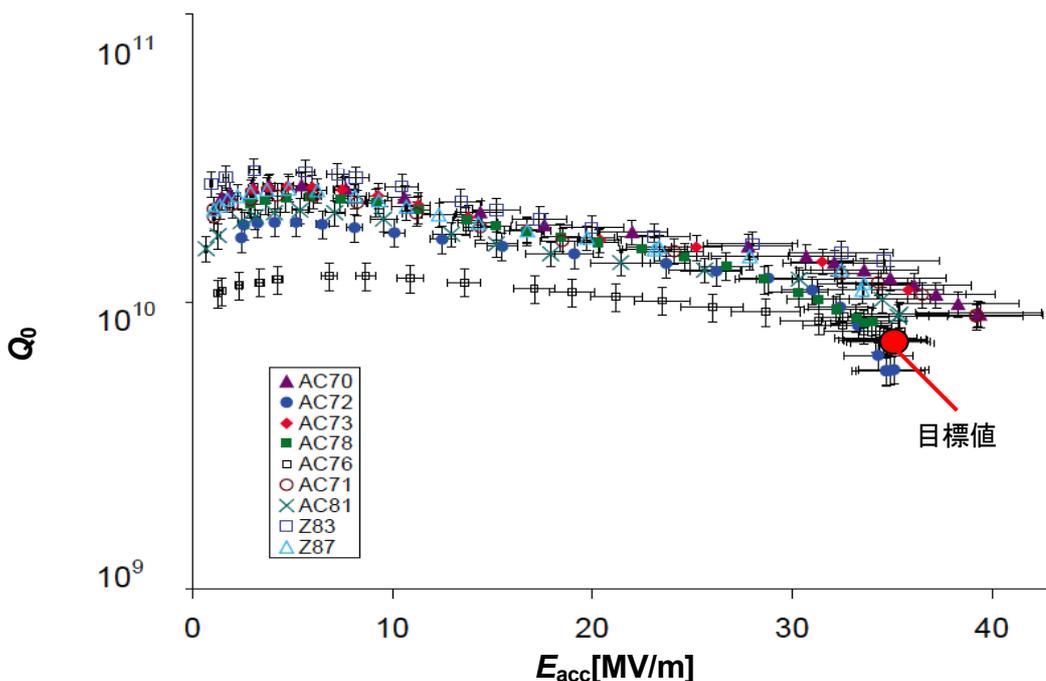


図 6-4 試験で得られている種々の超電導加速空洞 (9 セル) の加速勾配。

建設費のかなりの部分は加速空洞の製作費である。特に、Nb 材とその製作方法によって価格が左右されるので、製法や空洞内面の洗浄方法などの開発研究が行われている。銅と Nb のクラッド材にすることで Nb 材を減らす研究もされている。全部で約 17,000 個の 9 セルの空洞が必要であり、確実に目標性能が得られる製作上の歩留まりが計画の死命を制すると言っても過言ではない。

## b) 冷凍システム

現在の設計では、10 台の冷凍機で 2 K に冷却するようになっている。1 台の冷凍機の冷却能力は 4.5 K 換算で約 25 kW である。冷凍機 1 台での冷却長さは約 2.5 km で考えられており、この長さで、かつ超流動ヘリウムによる冷却はすでに CERN で経験されている。冷凍機能力もほぼ同程度である。冷却の基本ユニットは 12 クライオモジュール (全長 154 m) である。

冷凍機動力は、全部で約 48 MW (運転動力は 37 MW) と算定されており、電力消費の大きな割合を占めている。

## 7. まとめ

これまでにエネルギー・フロンティアとしての高エネルギー加速器について述べてきた。できるだけ高い粒子エネルギーを得るために、強い磁界や高い加速勾配を必要とし、超電導技術の応用が不可欠である。その究極として、ILC 計画が進められつつある。今まさに運転を開始した LHC とは

相補的な関係にあり、高エネルギー物理の最前線とともに重要な働きをしようとしている。

ILC 計画は、ITER に匹敵する規模のプロジェクトである。幸い高エネルギー物理では、これまで国際協力のもとに計画を遂行する経験を持っているので、ILC も齟齬なく完遂されるものと思う。

超電導技術、特に超電導磁石技術は、高エネルギー物理の分野で発展してきた。それは、この分野では超電導技術が必要不可欠なものであったからである。今回触れることができなかったが、高エネルギー物理実験用検出器には磁場が必要であり、水素泡箱の時代から現在の検出器にいたるまで、最先端の超電導・低温技術が随所で駆使されてきた。高エネルギー物理には超電導・低温技術が不可欠であり、それらの技術が遺憾なく発揮されてきた分野である。

#### 参考文献

横谷馨、「ILC (International Linear Collider) 計画、低温工学 40 巻 12 号 (2005) pp. 549-557.

ILC の種々の情報については HP <http://lcdev.kek.jp/> を参照。

ILC の最近の動向については、A. Yamamoto, “Superconducting RF cavity development for the International Linear Collider,” presented at ASC 2008.

[超電導 Web21 トップページ](#)