



LHCの主リングには、陽子ビームを偏向させる1,232台の超伝導双極磁石が0.1 mmの精度で設置されている。写真は、超伝導双極磁石の接続部分。
(画像提供:CERN)

ヒッグス粒子発見に 貢献した日本の 非磁性鋼

2012年、国際的なプロジェクトであるLHC(大型ハドロン衝突型加速器)で「ヒッグス粒子」が発見された。LHCでは、超伝導磁石をはじめさまざまな装置や材料に日本の技術が貢献している。今回はその中から、安定した磁場の発生に欠くことができない超伝導磁石用材料として採用された日本の非磁性鋼について紹介する。

巨大化する加速器で素粒子を発見する

2013年、ブリュッセル自由大学のFrancois Englert氏とエディンバラ大学名誉教授Peter W. Higgs氏に、ノーベル物理学賞が授与された。両氏の理論で予想された素粒子に質量を与える「ヒッグス粒子」を実験的に確認したのが、スイスのジュネーブ郊外にフランスとの国境をまたいで建設されたCERN(欧州原子核研究機構)の巨大な加速器、「LHC(大型ハドロン衝突型加速器:Large Hadron Collider)」である。

素粒子研究の歴史は、加速器の発達の歴史と言うことができよう。宇宙線を研究して新しい粒子を見つけ出す時代から、加速器で新しい粒子を生み出す時代になり、次々に大型の加速器が建造されるようになった。

質量の大きな粒子を生成するためには、大きなエネルギーが必要になるが、1970年代に存在が確認されたチャームクォークやボトムクォークを生成するためには、約10GeV(eV:エレクトロンボルト)のエネルギーが必要であった。さらに質量の大きなトップクォークは1995年に発見された。そのために必要

な衝突エネルギーは約1TeVで、それを実現したのが当時、世界最大級の加速器であった米国のテバトロン(Tevatron)である。当初、トップクォークよりも大きな質量を持つと予想されたヒッグス粒子を発見するために、LHCではテバトロンを大きく上回る7TeVの陽子ビームによる実験が行われた。

同じ消費エネルギーで高い衝突エネルギーを得るためには、重い粒子を大きな半径で周回させることが効率的である。そのため、LHCの主リングの周長は約27kmと、東京の山手線に匹敵する大きさになっている。

LHCの陽子ビームの衝突点は4つあり、ヒッグス粒子を発見した汎用検出器のATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS)とCMS(Compact Muon Solenoid)のほかに、ALICE(A Large Ion Collider Experiment)、LHCb(Large Hadron Collider Beauty)がそれぞれの衝突点に設置されている。衝突点では、長さ8cm、直径20 μ mに絞られた陽子ビームが衝突することで、1秒間に5億回の衝突反応を起こすよう設計されている。

標準模型に登場する素粒子

自然界の4つの力のうち、重力を除いた、電磁気力、弱い力、強い力を統一的に説明しようとする試みが「標準理論」であり、そこで示される物質と力の方程式が「標準模型」である。素粒子に質量を与えると考えられるヒッグス粒子の発見により、標準模型を構成するクォーク、レプトン、ボソンのすべてが発見されたことになる。

2012年に発見されたヒッグス粒子はトップクォークより小さな質量であったが、その発見はトップクォークの発見から17年後であった。その理由は、ヒッグス粒子の相互作用が小さく、トップクォークよりも生成しにくいということと、相互作用が小さいために観測が難しいことの2つである。ヒッグス粒子には複数の種類が存在するという理論もあり、LHCでの今後の研究成果が期待されている。

粒子			質量 (GeV/c ²)
フェルミオン	クォーク	u アップ	~0.002
		d ダウン	~0.005
		c チャーム	1.3
		s ストレンジ	~0.1
		t トップ	173
		b ボトム	4.2
	レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	(0~0.13)×10 ⁻⁹
		e 電子	0.000511
		ν_μ μ ニュートリノ	(0.009~0.13)×10 ⁻⁹
		μ ミューオン	0.106
		ν_τ τ ニュートリノ	(0.04~0.14)×10 ⁻⁹
		τ タウ	1.777
ボソン	γ 光子	0	
	W ⁺ /W ⁻ Wボソン	80.39	
	Z ⁰ Zボソン	91.188	
	g グルーオン	0	
	H ヒッグス	126	

陽子ビームを制御する超伝導磁石技術

LHCでは、水素から取り出された陽子が、主リングの前段加速器で450GeVまで加速される。主リングは、高周波加速空洞、偏向磁石、衝突点、検出器などから構成され、前段加速器から入射された陽子ビームは1周ごとに加速され、最終的に光速の99.9999991%まで加速された後、衝突させられる。

LHCにはさまざまな超伝導磁石が使用されており、その総数は6,628台にもおよぶ。中でも、偏向磁石に用いられる超伝導双極磁石 (main dipoleと呼ばれる) は最も重要なエレメントであり、その数は1,232台である。プリズムのように陽子ビームを偏向させる3台の超伝導双極磁石と、レンズのように陽子ビームを収束させる1台の超伝導四極磁石が1セットとなって、LHCの全周に配置されている。

超伝導双極磁石では、超流動ヘリウム温度である1.9Kに冷却されたニオブチタンの超伝導コイルに11.85kAの電流を流すことで、8.33Tの高磁場を発生させている。超伝導双極磁石の内部には、2つのビームラインが設けられており、互いに反対方向に陽子ビームが流れる構造になっている。ビームラインの周囲に配置された超伝導コイルを保持するのがカラーと呼ばれる部材で、カラーはさらにヨークで支持される。超伝導双極磁石は、最外層のシェルを含めた3つの構造により機械的に支持する構造が採用されている。超伝導コイルやその支持材料など、冷却が必要な部材の総重量は約37,000tにおよび、冷媒として約96tの液体ヘリウムが使用されている。

加速器用の超伝導磁石には高い寸法精度が要求される。陽子ビームを正確に曲げるためには磁場の誤差を1/10,000以下に抑える必要があり、超伝導コイルの位置決め精度は20 μ m以下

が求められる。さらに、8Tの磁場を発生させた場合にかかる磁気圧は約210N mm⁻²にも達する。超伝導コイルの位置がずれると磁場の歪の原因になり、陽子ビームの制御精度を低下させ、磁気臨界によるクエンチ (超伝導破壊) につながる恐れもある。大きな磁気圧がかかる超伝導コイルを構造的に保持しながら、発生した磁場を歪めないために、カラー材料には、十分な強度を持った非磁性鋼を用いる必要がある。

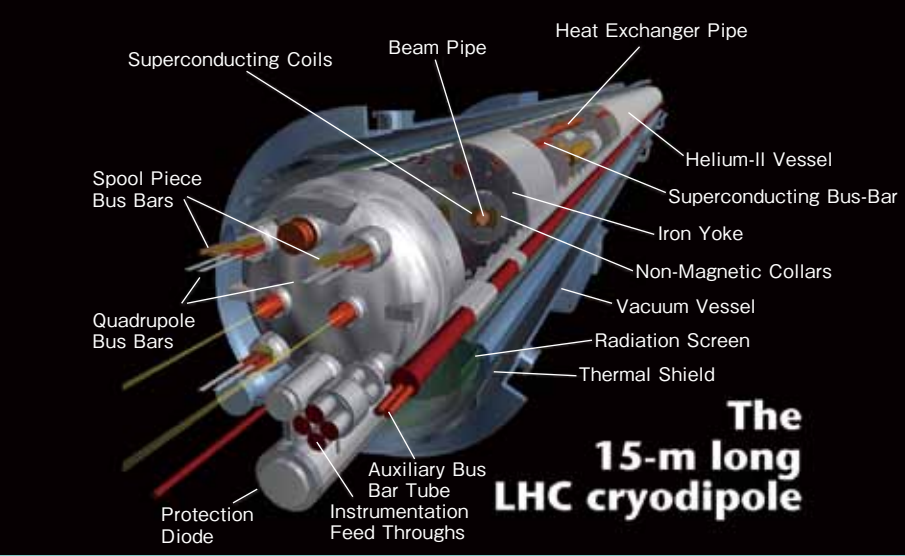
また、1台の超伝導双極磁石の全長は約15mであるが、超伝導線が急激に曲げられている端部では磁場が10～20%も強くなる。端部以外のヨークには普通鋼が使用されているが、超伝導コイル端部のヨーク (エンドヨークと呼ぶ) に普通鋼を使用すると、磁気臨界によりクエンチを発生する恐れがある。そのため、エンドヨークには非磁性鋼が普通鋼と組み合わせられることで、局所的な磁場の上昇を抑制している。

適材適所で採用された高性能非磁性鋼

非磁性体とは、一般的に磁気誘導作用をほとんど受けない、すなわち、磁石に引き寄せられない物質を指す。これとは逆に、磁石に近づけると吸引力が働く鉄、コバルト、ニッケルなどの強磁性体や、磁石と反発するアンチモン、ビスマス、銅などの反磁性体がある。

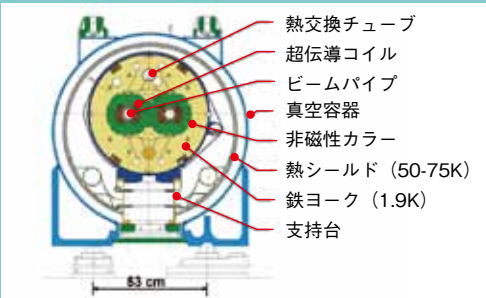
非磁性鋼の用途は多岐にわたる。身近な例では、縫い針の混入を防ぐ検針器の誤検知を防ぐために衣類のファスナーや、磁気テープを使用する機器でテープを支持するピンの材料として利用されている。医療用では磁気断層撮影装置など、産業用では発電機や変圧器 (筐体のふた) に使用されている。また、油井などの掘削ドリルのカラーにも、各種センサーへの影響がなく、耐腐食性の高い非磁性ステンレス鋼が用いられている。

■超伝導双極磁石の全体構造



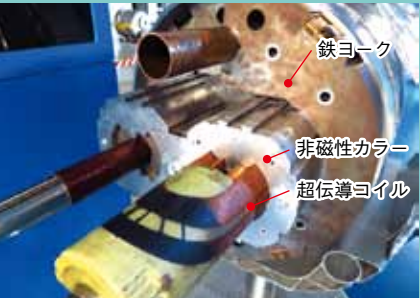
主リングに設置された陽子ビームを偏向させる超伝導双極磁石の構造図。欧州で陸上輸送が可能な最大長から、装置の全長(15m)が決められた。(画像提供:CERN)

■超伝導双極磁石の断面図



ビームパイプを取り囲むようにして、二重に超伝導コイルが取り囲んでいる。超伝導コイルは非磁性ステンレス鋼のカラーで支持され、カラーを外側の鉄ヨークで圧縮することで固定する構造になっている。(画像提供:CERN)

■超伝導双極磁石のカットモデル



帯状の超伝導線はビームパイプ表面に対して幅方向が垂直になるよう配置され、端部では超伝導線が180°曲げられている構造になっている。(画像提供:CERN)

■非磁性カラーの形状



複雑な形状の2つのパーツを組合せて、積層することで、超伝導コイルを支持する非磁性カラーが構成されている。(画像提供:CERN)

LHCで用いられる非磁性鋼には、このような一般的な非磁性鋼と異なるさまざまな特性が求められる。LHCの超伝導双極磁石は、均一で安定した磁場を生成する役割を持っている。そこに用いられる非磁性鋼で最も重要な要求特性は、比透磁率と熱収縮率である。

比透磁率が限りなく1に近い(真空/空気に近い)ことは、均一な磁場の実現に不可欠の特性であり、LHCのカラー材料には、4.2Kでの透磁率が1.003以下であることが求められた。一般に透磁率は、機械加工や溶接などの影響で上昇する場合がある。そこで超伝導双極磁石では、溶接の熱影響を避け、かつ

■超伝導磁石用非磁性材料の典型的な組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
非磁性ステンレス鋼 (NSSC130S)	0.09	0.4	11.5	0.022	0.001	18	0.1	6.6	0.3
高マンガン非磁性鋼 (KHMN)	0.1	0.6	28	0.033	0.002	7.1	<0.1	1.0	0.1

■超伝導磁石用非磁性材料の比透磁率

	μ_r at 4.2K B = 0.1T	μ_r at 4.2K B = 3T	μ_r at 1.8K B = 0.1T	μ_r at 1.8K B = 3T
非磁性ステンレス鋼 (NSSC130S)	1.0022	1.0019	1.0019	1.0019
高マンガン非磁性鋼 (KHMN)	1.0015	1.0011	1.001	1.001

■超伝導磁石用非磁性材料の熱収縮率 (室温~1.9K)

非磁性ステンレス鋼 (NSSC130S)	2.6×10^{-3}
高マンガン非磁性鋼 (KHMN)	1.8×10^{-3}

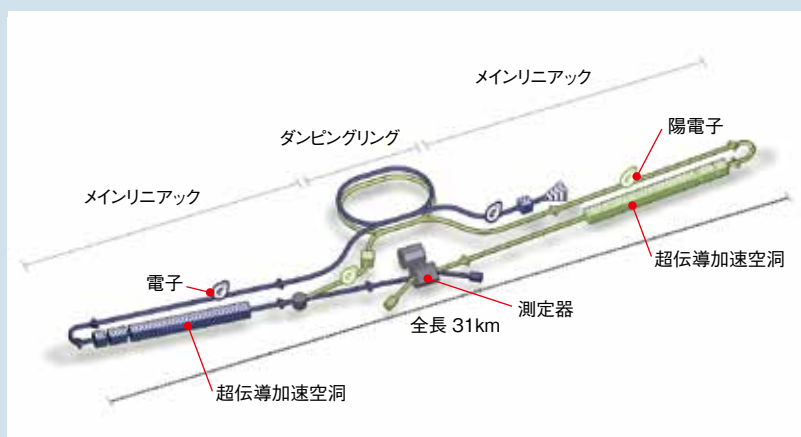
マンガン量を増やすことで、極低温での低透磁率を実現している。透磁性は磁場が変化しても安定であることも重要である。また、熱収縮率は、隣接する材料(銅、鉄)に近いことが求められる。

「C. Lanza, D. Perini, "Characteristics of the Austenitic Steels Used in the LHC Main Dipoles", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 12, NO. 1, MARCH 2002」および「野原清彦, 金属vol. 79(2009)No. 6, p. 70」を元に作成

次代の素粒子物理学を拓く「ILC」

LHCの次を担う加速器としてILC（国際リニアコライダー：International Linear Collider）が計画されている。これは、全長約30 kmの直線状の加速器をつくり、現在達成しうる最高のエネルギーで電子と陽電子の衝突実験を行うものである。LHCと大きく異なるのは、衝突させる対象が陽子ではなく、電子と陽電子である点だ。電子は1個の素粒子であるが、陽子は3個のクォークとその周りを飛び交っているグルーオンの複合体である。このため、陽子同士を衝突させると、本当に必要な素粒子の反応以外にも、不必要な反応が同時に多数、生成することになる。これに対して、電子と陽電子を衝突させる場合には、観測したい反応のみを生成させることが可能

で、ノイズのない観測が可能になる。今後ILCでは、「ヒッグス粒子」と「ヒッグス場」をより詳細に理解するための知見が得られるものと期待されている。



米欧アジアの三極が協力して2020年までの完成をめざしている、「国際リニアコライダー計画」の加速器の想像図。（画像提供：KEK）

必要な形状精度を実現するために3mmの非磁性鋼を積層する構造が採用されている。そのため、板材にはJISの板厚許容差の約1/3という $3.0\text{mm} \pm 0.075\text{mm}$ の寸法精度が求められた。

熱収縮率については、カラーとエンドヨークでは異なる条件が求められる。銅が主体の超伝導コイルを冷却時でも保持できるようにするため、カラー材料は熱収縮率が銅と同程度であることが必要となる。同様の理由で、エンドヨーク材料には鉄と同程度の熱収縮率が求められる。最終的に、これらの条件に適合する材料として、日本で開発された2種類の非磁性鋼が採用された。具体的には、カラー材料には非磁性ステンレス鋼、エンドヨーク材料には高マンガン非磁性鋼が採用されている。これらは低温で小さい比透磁率と、それぞれ適用箇所に最適な熱収縮率を示すことが採用の決め手となったものである。

LHCには、11,000tの非磁性ステンレス鋼と、1,700tの高マンガン非磁性鋼が使用されているが、量産技術にも日本で培われた技術が活かされている。例えば、LHC用の非磁性ステンレス鋼の生産にあたっては、通常のステンレス鋼の生産よりも厳密な成分制御と不純物除去が必要になる。また、JISの板厚許容差の約1/3という寸法精度を実現するためには、高度な圧延技術も必要である。日本の企業がこれまで培ってきた、成分制御、溶解、鋳込み、組織制御、圧延などの、すべての工程を厳密に制御、管理する「一貫管理」の手法が基盤となり、LHCで求められる安定した品質が可能になったといえるだろう。

LHCの精度向上に貢献する非磁性鋼

LHCは2015年から、衝突エネルギーを倍増した14TeVでの実験を開始する予定だが、2023年にはLHC高輝度化アップグレードが計画されており、現在そのための研究が進められている。高輝度化とは衝突ミノシティ（単位時間当たり単位面積当たり通過する粒子の数）を現状の $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ の5倍に向上させることであり、これにより実験データをより効率的に収集し、統計精度を向上させることが可能となる。

高輝度化のための研究開発は、CERNを中心とした国際協力として進められている。日本では、ビーム衝突点超伝導磁石システムを構成するビーム分離用大口径双極磁石の設計を担当している。これまでと同様に高い磁場精度が要求されるため、前述の主リングの超伝導双極磁石で実績のある非磁性ステンレス鋼が採用される予定である。アップグレード向け超伝導磁石の基本設計は2015年中に完了し、量産に向けた作業が開始される計画である。

現在、高性能の非磁性鋼の用途は医療分野やエネルギー分野、先端科学分野などが中心であるが、今後はリニアモーターカーシステムや核融合発電などでも不可欠の材料になっていくと期待される。非磁性鋼はこれからも、最先端技術を支える鉄鋼材料として、活躍の場を広げていくことだろう。

- 取材協力 高エネルギー加速器研究機構(KEK)、新日鐵住金ステンレス(株)
- 文 石田 亮一