国際協力

CERN–LHC 加速器における超伝導磁石と開発協力

山本　明*1・中本　建志*2・佐々木　憲一*2

CERN–LHC Accelerator Superconducting Magnet: Development and International Cooperation

Akira YAMAMOTO, Tatsushi NAKAMOTO and Ken-ichi SASAKI

Abstract

CERN–LHC accelerator superconducting magnets and a cooperative work for interaction region quadrupole magnets are introduced. The accelerator commissioning and the incident happened during the commissioning in 2008 is also briefly discussed.

1. はじめに

欧州合同原子核研究機関（CERN）におけるラージハドロンコライダー（LHC）加速器は，1994 年に建設が決定され，CERN メンバー 20 カ国，および米国，日本，カナダ，インド，ロシア等が准メンバーとして参加して建設が進められた[1]．日本政府は，1995 年に LHC 計画への参加を表明し，加速器建設を分担した．KEK では，それまでの CERN との主偏向磁石基礎開発協力実績を基に[2]，FNAL との協力によって 4 カ所のビーム衝突点における最終ビーム収束用超伝導磁石（Inner Triplet）の開発を担った[3–9]．また，日本企業が LHC 加速器建設・国際入札に参加する道が拓かれ，製造，品質管理技術を活かして，加速器・測定器要素機器の製造に大きく貢献した．本稿では，LHC における加速器超伝導磁石と日本の開発協力を中心とし，LHC 加速器コミッショニングを迎えた近況を解説する．

2. LHC 加速器における超伝導技術

LHC 加速器は，重心系エネルギーで 14 TeV の陽子・陽子衝突型加速器であり，米国フェルミ国立加速器研究所（FNAL）で稼働中の Tevatron 加速器の 7 倍のエネルギー，2 桁高いルミノシティーを実現する（**表 1**）．質量の起源とされる Higgs 粒子の探索，標準理論を越える新たな素粒子物理現象の探索を目指す．周長 27 km にわたり存在した旧（LEP）加速器のトンネル内に，超伝導技術，極低温冷却技術を駆使した LHC 加速器を新たに建設した（**図 1**）．LHC 加速器は，1232 台の主偏向磁石（**図 2**），392 台の主収束電磁石，5000 台を越える多重極，補正磁石および超伝導高周波加速装置等により構成される．LHC 計画では，既存の周長 27 km の旧 LEP トンネルを利用し，最高の性能を達成する為，NbTi 超伝導材を超流動 He 温度まで冷却し，主偏向磁石では，中心磁場 8.4 T（設計値，8.33 T），コイル内ピーク磁場 9 T に迫る性能を引き出している[10,11]．30,000 トンにおよぶ磁石総重量を 1.9 K まで冷却する為に，周長に沿って 8 箇所の冷却基地を設け，4.5 K 冷凍機と 1.8 K 冷凍

表 1　Tevatron と LHC 加速器パラメーターの比較

Accelerator	Tevatron (FNAL)	LHC (CERN)
Energy (TeV)	0.98 + 0.98	7 + 7
Circumference (km)	6.3	26.7
Luminosity ($cm^{-2}s^{-1}$)	10^{32}	10^{34}
Main Dipole field (T)	4.4	8.4
Dipole aperture (mm)	76 (single)	56 (twin)
Number of dipoles	774	1232
Cryogenics power (kW) at 4.2 K/1.8 K	2.3	144/19.2
Completion (year)	1985	2008

*1 高エネルギー加速器研究機構（E-mail: akira.yamamoto@kek.jp）
*2 高エネルギー加速器研究機構

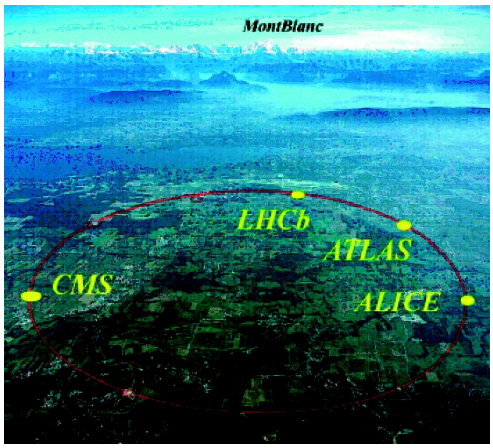

図 1　CERN–LHC 加速器サイト

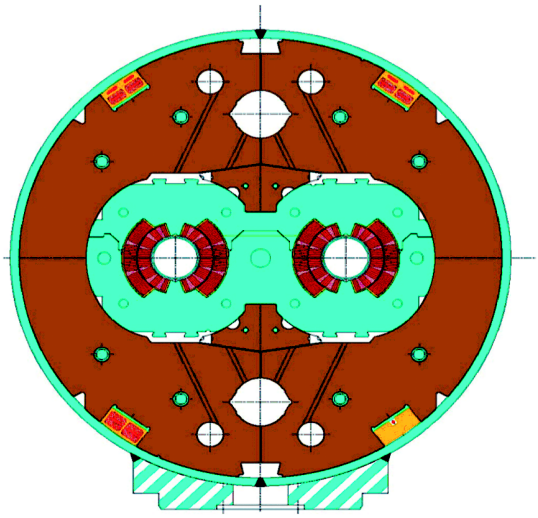

図 2　主偏向電磁石断面

機の複合冷却システムが開発されている．1.8 K 冷凍システムは，4.2 K 冷凍機から液体ヘリウムを吸入し 1.5 kPa まで減圧するコールドコンプレッサーにより，飽和蒸気圧温度である 1.8 K を発生させる．コールドコンプレッサーの高効率化に，日本の工業技術が大きく貢献した．2006 年から，冷却システムのコミッショニング（試運転）がはじまり，2008 年には，磁石を含む全システムのコミッショニングが進められた．

3.　ビーム衝突点四極超伝導磁石の開発協力

ATLAS, CMS 実験等の 4 箇所のビーム衝突点（図 3）では，物理実験における粒子衝突頻度を高めるため，強いビーム収束系が求められる．4 箇所の衝突点の両側に各 4 台の四極磁石（合計 32 台）により強収束レンズ系を構成し，215 T/m の強磁場勾配を直径

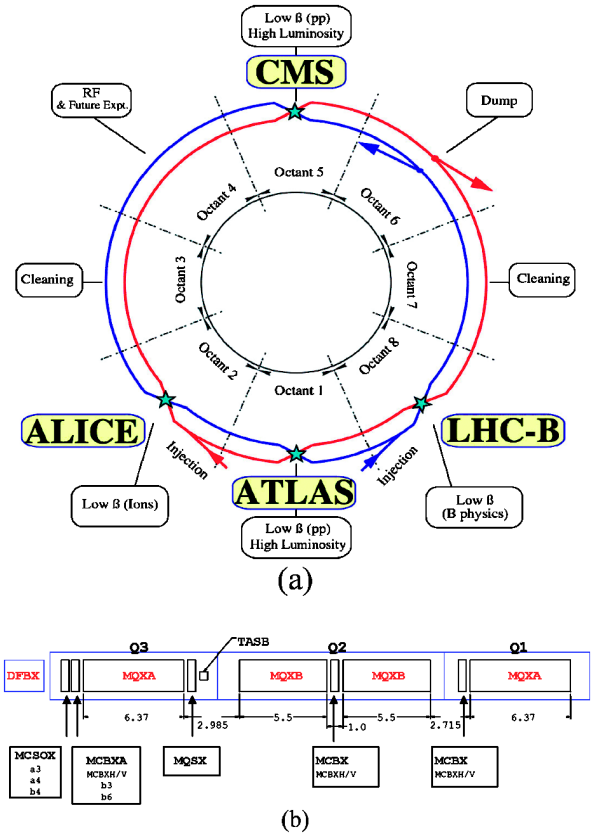

図 3　(a) LHC ビーム衝突点配置，(b) ビーム収束系 Inner Triplet (Q1, Q2, Q3) 磁石システム配置

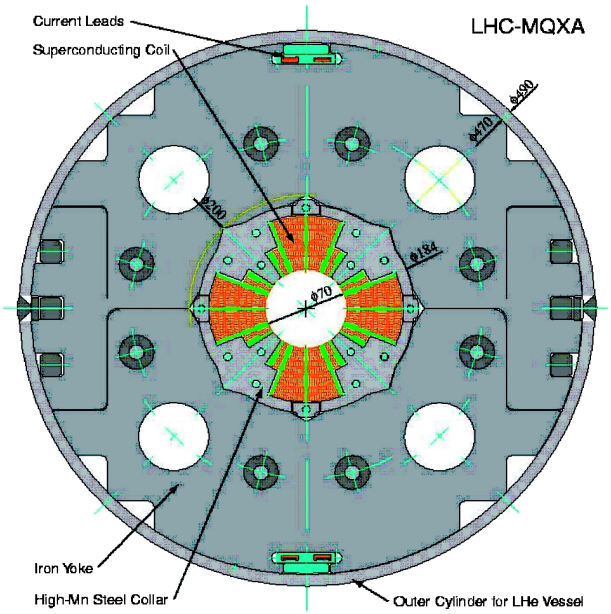

図 4　ビーム衝突点用収束磁石断面（MQXA）

70 mm の口径に発生する（図 4）．コイル内の最高磁場は 8.6 T に達する[11–15]．ビーム衝突の為の最終ビーム収束（inner triplet for low-beta insertion）部である

表 2　衝突点四極磁石の主要設計パラメータ[8)]

	MQXA (KEK)	MQXB (FNAL)
Field gradient (T/m)	215	215
Coil inner radius (mm)	35	35
Magnetic length (m)	6.37	5.5
Peak field in coil (T)	8.6	7.7
Quench field (T)	10.7	9.2
Nominal current (A)	7149	11,672
Inductance (mH)	90.1	19.2
Stored energy (MJ)	2.3	1.36
Operating temp. (K)	1.9	1.9

ことから，磁場精度に対する要求が特に厳しく半径17 mm（口径の半分）において，磁場の高調波成分を10^{-4}以下に抑えることが求められた．また衝突点で散乱されたビームによるコイルへの入熱が5 W/mに達すると予想され，それに耐える安定性が求められた．CERNはこれらの開発をKEKとFNALの協力に託し，トリプレット（Q1～Q3）のうち両端部（Q1, Q3: MQXA）をKEKが担当し，中央部（Q2a, Q2b: MQXB）をFNALが担当した[8,9)]．磁石の設計は夫々の研究所に任され，夫々の技術の特色，制約等をふまえパラメータを最適化した（**表 2**）．KEKは運転電流7 kAレベルでの四層コイルを選択した．この四極磁石の特色は，(1)電流密度のグレーディングをもつ4層コイル，(2)非磁性鋼による薄肉スペーサーカラー，(3)上下に分割，キー構造をもつ鉄ヨーク構造である[5)]．開発のなかで最も力を注いだことは，磁場精度の達成とその再現性であった．衝突型加速器における低ベータ挿入磁石として，10^{-4}の磁場精度達成の為には，コイル，磁石の製作精度を50ミクロン以下に制御することが求められた．この為に，コイル設計の再チューニング，再現性の確認，工業化への技術移転等を含み，基礎開発に5年間を要した．超伝導低温工学センター，機械工学センター，加速器研究施設，素粒子原子核研究所からの開発メンバーが協力し，1996年から第一段階としてインハウスでの1 mモデル磁石（5台）での技術の確立及び性能再現性の検証を経て，実機長プロトタイプ（2台）での技術移転，技術確認を行ったうえで，2001年より実機（予備を含む20台）の製作を行った．実機の製作，試験には3年間を要した．超伝導線材の開発段階では，日立電線㈱，住友電工㈱に，実機製造では，古河電工㈱が担当した．実機超伝導磁石の製造は，㈱東芝が担当した．

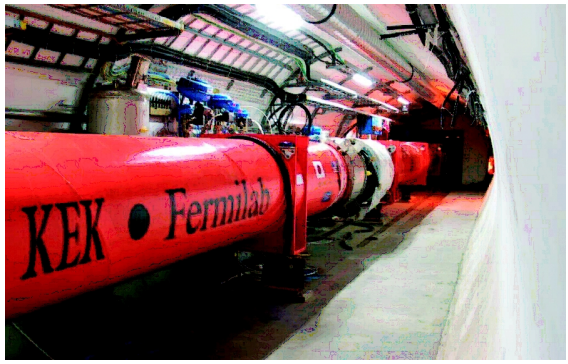

図 5　トンネル内に設置されたビーム衝突点磁石群

KEKでは縦型の超流動ヘリウム・テスト用クライオスタットを新たに設置して，実機全数の性能試験を行った．試験は，運転最大磁場勾配215 T/mを越える230 T/mまでの励磁（トレーニング）性能，クエンチに対する安全性の確認，磁場測定を行った．全ての磁石が230 T/mに到達した．LHC加速器におけるビーム光学から要求される磁場性能について，いずれの高調波成分も満足する結果が得られた．磁石製造の効率化の為のヨーク2分割構造に伴う縦楕円変形を示す8極成分（b_4）のみが系統的に，許容される範囲内で大きな値を示したが，磁場精度（高調波成分）の再現性はいずれも10^{-5}レベルで安定した．これらの開発経過は，これまでに出版された解説に，纏められている[6,7)]．

KEKで試験された超伝導磁石は，FNALに送られ，クライオスタットに組み込まれた．そのうちの2台についてはクライスタット組み込み後の性能試験が行われ，KEKでの試験結果が検証された．FNALでのクライオスタットへの組み込み後，CERNに送られ，地上でのトリプレット・アセンブリー試験後，トンネルに組み込まれた（**図 5**）[16)]．

4.　衝突点超伝導磁石コミッショニング

トンネル内に設置後に起きた様々な課題を乗り越え，2008年，衝突点磁石システムの冷却，励磁を含むハードウエアコミショニングが進められた．4月には，衝突点磁石システムとして初めての励磁試験が，セクション5Rに対して行われた[7)]．

全ての磁石は直列に接続されているが，FNALが開発したMQXBの公称運転電流は11,672 Aであり，KEK開発のMQXAの公称運転電流7,149 Aとは異なる．そのため，電流供給部は3つの電源から構成されている（**図 6**）．全ての磁石と直列接続されている電源RQXによってMQXAの定格運転電流が供給

され，MQXB の定格運転に足りない電流（約 4520 A）は電源 RTQX2 によって，重ね合わせて供給される．電源 RTQX1 は，トリム電源と呼ばれ，衝突点側の Q1（MQXA）にのみ±550 A のトリム電流を供給する．

基本的なクエンチ検出はバランス信号 Vb1, Vb2, Vb3 によって行われる．これら電圧が 0.1 V 以上になると磁石がクエンチしたと見なされ，磁石に取付けられているクエンチ保護ヒータが作動する．その他，クエンチ検出システムの冗長性を確保するため，各磁石の全電圧 Vt1, Vt2, Vt3 が 5 V 以上になった場合にも磁石クエンチが発生したと見なされる．これはビーム起因によって磁石が均一にクエンチした状況を想定したもので，全てのシステムが完成した後で追加された機能である．

前述のように複雑な電源構成のため，実際のコミッショニングにおける電流励磁は慎重に進められた．試験項目としては，システムのインターロックをチェックする PIC（Power converter Interlock Control）試験，電源による電流制御の可否をチェックする PCC（Power converter Control Check）試験，電流通電と遮断またはスローダウンを繰り返す PLI（Power converter Current(I) Loop）試験，最後に電流を定格値まで上げる PNO（Power converter Nominal Operation）試験であった．これらについて，3 つの電流源を様々に組み合わせて上記試験を行なうため，1 つのシステムに対するコミッショニングとしては，試験項目は，LHC 加速器の他磁石よりも多くなった．

4 月 24 日夕方，最も重要となる定格運転電流までの通電が行われた．この Insertion System における 7 TeV での定格運転電流は MQXA が 6778 A，MQXB が 11315 A であったが，今回の目標値はそれを若干上回る，6800 A と 11400 A に設定された．**図 7** に，この励磁試験の電流プロファイルを示す．4 月 24 日 19 時 50 分に，一旦 RQX: 150 A, RTQX2: 100 A まで上げた後，同 19 時 53 分に目標電流までの励磁を両電源同時に指示，同 20 時 12 分に RTQX2 に若干遅れて RQX が目標電流まで無事到達し，中央制御室で様子を見守っていた関係者の間に，拍手が起った（**図 8**）．その後約 10 分間電流を保持，スローダウンしている様子までが**図 7** にプロットされている．この成功に引き続き，再度目標電流値まで通電，10 分間の保持の後，クエンチ保護ヒータを用いて磁石をクエンチさせた．クエンチ時の信号解析の結果，問題となるよ

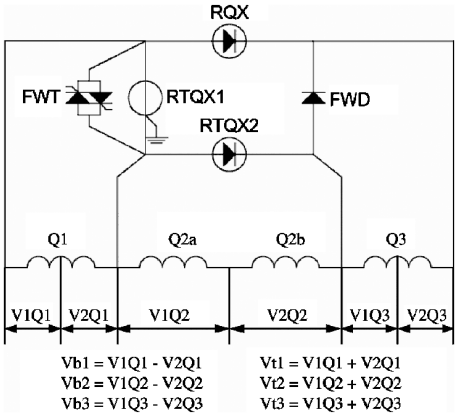

図 6　MQX 電源接続図およびクエンチ検出用電圧測定

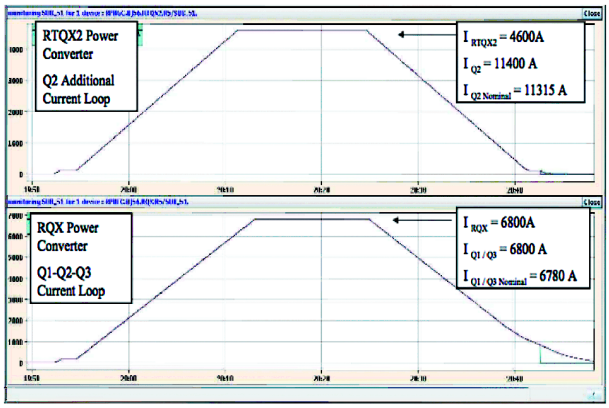

図 7　初めて定格電流まで通電時の，二電源系での協調並列運転における電流プロファイル

図 8　衝突点磁石励磁コミッショニングの成功を祝う

図 9　LHC 加速器ビーム入射コミッショニング

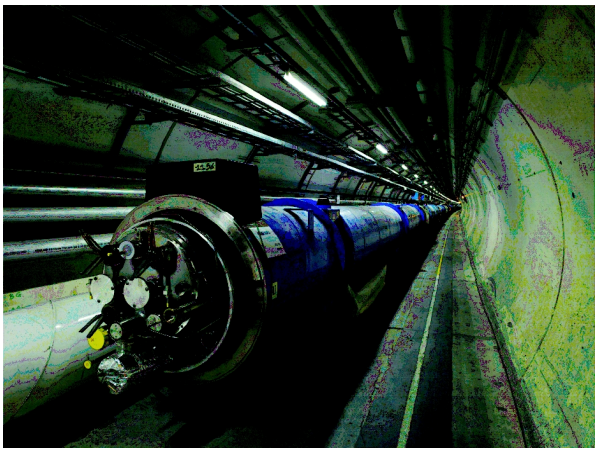

図10　トンネル内主偏向磁石及び超伝導線接続部

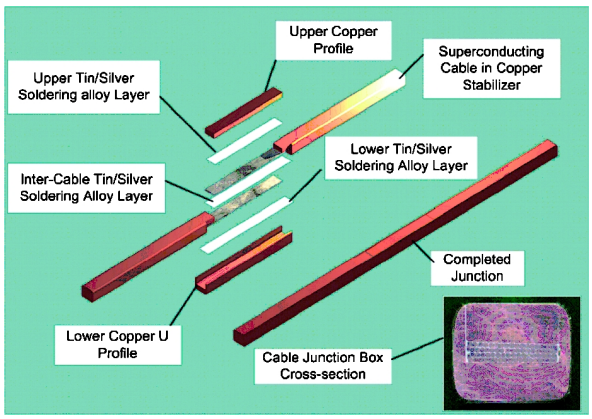

図11　超伝導ケーブルジョイント部の構成

うな異常信号は無く，磁石システムが安全に保護されている事が確認された．翌日，確認のためもう一度目標電流まで励磁，約 1 時間保持して各部の温度等に問題が無い事を確認し，5R の Insertion（Inner Triplet）磁石システムのハードウエアコミッショニングが完了した．

KEK が開発した磁石の LHC での初励磁という大きなマイルストーン達成に，KEK から佐々木が立ち会った．LHC という大プロジェクトにおいて，コミッショニングにおける組織運営や，多くの優秀なスタッフが様々な問題を対処していく様子を直接現場で見聞することができ，とても貴重な経験となった．

5.　加速器コミッショニングとインシデント

2008 年 9 月 10 日に，LHC 加速器コミッショニングの第一歩として，リングへのビーム入射，周回試験に成功し，歴史的な一歩を踏み出した（図 9）．進捗状況を全世界のメディアに向けて公開しつつ，コミッショニングを進め，作業開始からわずか 1 時間後には，ビーム周回を実現した．CERN の加速器技術力のレベルの高さを物語るものであり，全世界に感銘と感動を与えた[17]．

一方，その 1 週間後には，厳しい試練に直面することになった．ビーム加速試験の予備試験として行われた超伝導磁石のみの励磁（トレーニング）プロセスにおいて，5.5 TeV 相当電流近傍において，主偏向超伝導磁石のクエンチが発生，それを第一要因とした磁石の破損，トンネル内への大量なヘリウム漏洩が発生した．その後の原因調査，対策検討を経て，その全容が公開（2009 年 2 月）されるとともに，併行して，修復作業が急ピッチで進められている．このインシデントは，超伝導磁石大規模応用システムでの安全対策が未熟であったことを，思い知らされるものとなった．インシデントの発生事実，原因，今後の対策について，2009 年 2 月に開催された LHC performance workshop での公開の報告を基に[18]，これまでに理解できた事は以下の通りである．

5.1　発生事実（インシデント，2008 年 9 月 19 日）

• LHC 加速器セクター 3–4 において，主偏向磁石ス

トリングを 7 TeV 相当の電流値を目標に励磁（トレーニング）する過程で，5.5 TeV 相当付近（電流約 9 kA）において，昇磁中，クエンチ信号による電源遮断とともに，磁石のクエンチ連鎖，真空層の真空度悪化，トンネル内への大量ヘリウムの漏洩が確認された．（人身への災害はなし）．

- その後のトンネル内現場検証から，主偏向超伝導磁石間（インターコネクト）のケーブルジョイント部の一部焼失，周辺配管の破断，ビームパイプの破れ，磁石本体（コールドマス）のクライオスタット内での位置ずれが確認されるとともに，セクター内真空分割用隔壁部分での，断熱真空容器全体の移動が確認された．
- モニターデータの解析からは，電圧信号に擾乱が観測されてから 1 秒以内に，超伝導ケーブルの電圧が異常レベルに上がり，その後，2 トンを越えるヘリウムガスが，冷却システムから失われたことが確認された．

5.2 原因の考察（2009 年 2 月現在）

インシデント観測データの解析，現場検証に基づく考察から，トラブルの発生原因および因果関係は以下のように，理解される．

a） ある主偏向磁石間（図 10，11）の超伝導接続の半田接続不良と判断される原因で，接続抵抗が通常（ナノオーム）より二桁高い抵抗値のまま励磁試験，トレーニング試験を進めてしまった結果，～9 kA 近くで電流を上昇中，冷却とのバランスが崩れ，熱暴走を起こして半田が溶け，接続部が外れ，オープン回路となり，誘導された電圧によって放電（電流アーク）を誘発した．

b） 接続部のクエンチを専用に監視するモニターが未整備で，隣の磁石がクエンチを検出した時点では，すでに接続部が熱暴走していた，または断線していたと推測される．

c） 電流アークによって，ジョイント部を覆っているステンレスパイプに孔が開き，液体ヘリウムが真空容器内に一気に噴出した．

d） 真空容器内の真空度の劣化とともに，電流アークがさらに広がり，周辺のパイプ，ビームパイプ等にも孔をあけ，被害を広げた．

e） 真空容器内に漏洩を続けたヘリウムはガス温度上昇に伴う圧力急上昇となり，リング 1/8 セクター内をさらに分割する真空隔壁部に，過大な力を与えた．そして両端部（隔壁部）の真空容器では，トンネル床に固定された真空容器アンカーの保持限界を越え，アンカーボルトを引きはがすとともに，真空容器の位置をずらすまでに至った．このことが，大きな二次災害をもたらした（図 12）．

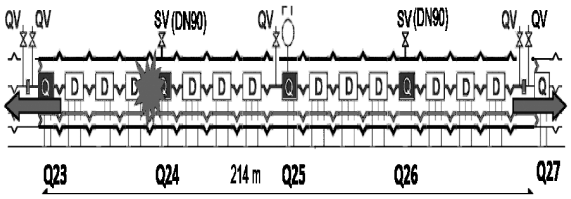

図12 セクター 3-4 における磁石ストリング，インシデント発生点（Q24），および真空隔壁作用点（Q23, Q27）と真空容器安全弁（SV）の位置

f） 真空容器の移動により，連結する磁石本体（コールドマス，液体ヘリウム容器系）に，過大な力かけ，磁石間の超伝導ケーブル接続，各種配管を破壊するとともに，連鎖するコールドマスを連結した状態で，引張り，コールドマスサポートの保持力限界を越え，複数個連鎖した状態での移動を引き起こした．

以上の結果，インシデント後には，3-4 セクターの磁石約 200 台の内，約 50 台を地上に引き上げ，修理点検が必要となった．

5.3 今後の防止対策（2009年 2 月現在）

昨年秋から進められている磁石の修復，主要な抜本的安全保護対策は，以下の通りである．

a） 損傷した磁石を予備機（新品）に交換する

b） 全ての超伝導磁石のケーブル接続部に専用高感度クエンチ検出モニター，安全保護回路へのフィードバック機構を整備，

c） 真空容器の安全弁の増強（昇温できるセクター毎に進める），

d） 真空隔壁を有する真空容器床面固定部のアンカー補強

e） ビームパイプ内面の清浄

これらの対策を 2009 年の夏までに完了し，秋には，ビーム運転再開が目標とされている．

6. LHC アップグレードにむけた基礎開発

LHC 加速器運転開始後，10 年を見据え，ルミノシティーアップグレード構想（Super-LHC）の検討，基礎開発がすでに始まっている．リニアック増強とともに，大きな技術課題となるのが衝突点の最終ビーム収束系のさらなる高性能化，低ベータ化である．その鍵を握る技術課題が，収束系磁石の大口径化（～100 mm），高磁場勾配（＞215 T/m））であり，コイル内

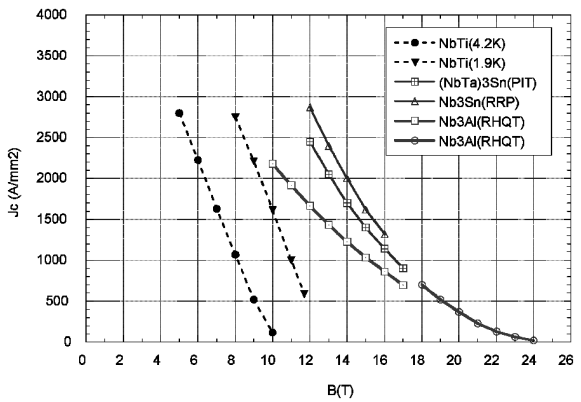

図13　NbTi, Nb_3Al, Nb_3Sn の臨界電流密度の比較

ピーク磁場は10 Tを大きく越える．これまでのNbTiに変わり，Nb_3Sn, Nb_3Al 等の化合物超伝導線（**図13**）を用いた加速器用超伝導磁石の開発が不可欠となる[19]．コイルエンド部でケーブルの曲げ曲率，電磁力の支持，ケーブルの磁化問題など，多くの技術開発課題を抱えている．この為の基礎技術開発がすでに精力的に進められている．特に，米国では，FNAL, LBNL, BNLが協力し，Nb_3Snを超伝導素材とした磁石開発に取り組んでいる．すでに，1 mモデルでは，口径9 cm級において200 T/mを越える性能を達成している[20,21]．日本ではKEK，FNAL，物質材料研究機構（NIMS）が協力し，米国FNAL, LBNLの協力も得て，Nb_3Alを超伝導材とした超伝導磁石の開発を目指している[22–24]．NIMSで開発された「急熱急冷法」を用いたNb_3Al線材は，高磁場下で強い機械特性を発揮し，15 Tを越える磁石を目標とした時，非常に有効な候補となる．この開発には，地道な取り組みを必要とする．日米が連携し，日本で育まれた技術を活かした国際協力による開発を推進し，実機開発に対応できる技術力を確立したい．このため，今後約5年間で，Nb_3Al超伝導線材の電流密度の増強，安定化材の付加，ケーブル化，超伝導コイルの試作へと，地道な基礎開発を推進する．

7.　日本企業の技術貢献

日本政府の貢献をベースとした加速器要素機器製造の国際入札参加を通して，日本の工業界の技術力を活かした貢献が実現した．古河電工によるLHCアーク部主偏向磁石用超伝導線の製造は，全周の磁石の1/8にあたる超伝導ケーブルを製造するとともに，ヨーロッパ，アメリカの企業の製造分にも協力した[25]．特に，その品質の安定性と，生産スケジュールの正確さに高い評価を得た．冷却技術分野からは，石川島播磨重工とLINDE（スイス）のコンソーシアムによる，コールドコンプレッサーをコア技術とした超流動ヘリウム冷凍機システムが，注目された．プロトタイプ開発段階で，参加企業のなかで最も高い熱機械効率記録を達成し，高い評価を得た[26,27]．古河電工，石川島播磨重工には，LHC加速器建設における産業界からの顕著な貢献に対して与えられるLHC Golden Hadron Awardが贈られている．

8.　ま　と　め

CERN/LHC計画における加速器用超伝導磁石の開発の現状，国際協力としての日本の貢献を紹介した．日本の超伝導技術が，国際的に，技術フロンティアとしての役割に貢献できたことは，非常に意義深く，また次世代を担う人材を育てることにも貢献した．この経験は，JPARCニュートリノビームライン磁石開発への技術基盤，人材基盤ともなった．

先端技術開発は，一朝一夕に成るものではなく，長期的な展望に立ち，地道な努力を重ねる以外に，道はない．筆者の一人が，LHC計画の為の高磁場超伝導磁石の基礎開発をCERNとの協力として取り組みを初めてから，加速器建設での協力に取り組み，現在に至るまでに20年以上の歳月を必要とした．これからは，次の世代にリーダシップを託し，LHCルミノシティーアップグレード，Super–LHC計画等，さらなる先端超伝導技術を応用した，エネルギーフロンティア加速器に取り組むCERNとの国際協力の発展を願う．

謝辞

本国際協力の実現にご尽力頂いた皆様に心より感謝致します．日本政府・文部科学省によるCERN/LHC計画への国際協力に感謝致します．加速器超伝導磁石開発における国際協力にあたり，CERN，FNALの協力に感謝致します．また，この国際協力にあたり，日本企業が特色ある技術をもって，加速器要素・製造に参加できたことは画期的でした．日本企業の先端技術への積極的な取り組み，国際貢献に，心より感謝致します．

KEKにおいて，超伝導低温工学センター，機械工学センター，加速器研究施設の協力によって，LHC超伝導磁石開発チームを集結し，国際協力推進を強くサポートして頂きました．特にKEK，木村嘉孝名誉教授，平林洋美名誉教授(故人)，新冨孝和名誉教授，近藤敬比古名誉教授に多くのご指導，ご支援を頂きました．心より感謝致します．

参 考 文 献

1) http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/.
2) 平林洋美，山本　明，“CERN–LHC 計画における高磁場超伝導電磁石の開発”低温工学，**27**(2), p. 99 (1992).
3) 新冨孝和，“LHC 加速器用超伝導磁石の建設協力”，低温工学，**31**(8), p. 418 (1996).
4) 近藤敬比古，新冨孝和，木村嘉孝，“CERN–LHC への日本の協力”，低温工学，**36**(10), p. 562 (2001).
5) 新冨孝和，“大型超伝導加速器の現状と展望”，応用物理，**66**(4), p. 365 (1997).
6) 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，**2**(2), pp. 263–269 (2005).
7) 中本建志，佐々木憲一，“LHC ビーム収束超伝導四極磁石の開発とコミッショニング”，高エネルギーニュース，**27**(2), pp. 67–77 (2008).
8) R. Ostojic, ‘‘Superconducting Magnets for LHC Insertions’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **14**(2), pp. 181–186 (2004).
9) J. Kerby, ‘‘Production status of the LHC inner triplet magnet system’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **13**(2), pp. 1229–1234 (2003).
10) K. Artoos, *et al.*, ‘‘Design, manufacturing status, first results of the LHC main dipole final prototypes and steps towards series manufacture’’, *IEEE Trans.*, **10** (1), pp. 98–102 (2000).
11) F. Savary *et al.*, ‘‘Description of the main features of the series production of the LHC main dipole magnets’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **18**(2), pp. 220–225 (2008).
12) A. Yamamoto *et al.*, ‘‘Design study of a superconducting insertion quadrupole magnets for the Large Hadron Collider’’, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity.*, **7** (2), pp. 747–750 (1997).
13) T. Shintomi *et al.*, ‘‘Progress of LHC Low-beta quadrrupole magnetst at KEK’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **11**(1), pp. 1562–1565 (2001).
14) A. Yamamoto *et al.*, ‘‘Production and measurement of the MQXA series of LHC low-beta quadrupoles’, presented at the 2004 Applied Supercond. Conf. (ASC2004), *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **15**(2), pp. 1084–1089 (2005).
15) Y. Ajima *et al.*, ‘‘The MQXA quadrupoles for the LHC low-beta insertions,’’ *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research*, A550, pp. 499–513 (2005).
16) S. Feher *et al.*, ‘‘Production and installation of the LHC low-beta triplets’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **16**(2), pp. 437–440 (2006).
17) 徳宿克夫，“LHC のビーム初周回の中継放送を巡って”，加速器，**5**(4), p. 318 (2008).
18) LHC performance workshop—Chamonix–2009. http://indico.cern.ch/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=45433
19) S. Gourlay, A. Devred and A. Yamamoto, ‘‘Future accelerator magnet needs’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **15**(2), pp. 1192–1199 (2005).
20) R. Bossert *et al.*, ‘‘Development and test of LARP technological quadrupole models of TQC series’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **18**(2), pp. 175–178 (2008).
21) S. Caspi *et al.*, ‘‘Test and analysis of technology quadrupole shell (TQS) magnet models for LARP’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **18**(2), pp. 179–183 (2008).
22) K. Tsuchiya *et al.*, ‘‘Development of Nb3Al supercoduting wire for accelerator magnets,’’ *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **14**(2), pp. 1016–1019 (2004).
23) T. Takeuchi, ‘‘Nb_3Al conductos forh igh-field applications’’, *Supercond. Sci. Technolol.*, **13**, pp. R101–R119 (2000).
24) A. Kikuchi *et al.*, ‘‘Cu stabilized Nb_3Al strands for the high field accelerator magnet’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **18**(2), pp. 1026–1029 (2008).
25) S. Meguro, ‘‘LHC cable production in Japan’’, *IEEE Trans. Appl. Superc.*, **14**(2), pp. 159–168 (2004).
26) N. Saji *et al.*, ‘‘A one kPA entrifural cold compressor for the 1.8 K helium refrigeration system’’, Proc. 17th Int. Cryog. Eng. Conf. (ICEC–17), pp. 295–298 (1998).
27) H. Asakura *et al.*, ‘‘Four 2400 W/1.8 K refrigeration units for CER–LHC: The IHI-Lide system’’, Proc. 18th Cryog. Eng. Conf (ICEC–18), pp. 215–218 (2000).