核融合および粒子加速器の大型計画で 要求される超伝導体*

Giorgio BRIANTI, Peter KOMAREK*

スイス 欧州合同原子核研究所
* 西独 カールスルーエ原子核研究所

訳：三戸利行，槇田康博，平林洋美

高エネルギー物理学研究所 つくば市大穂 1-1

(訳文 1987年12月14日受理)

Demands on Advanced Superconductors by Large Projects
in Fusion and Particle Accelerators

G. BRIANTI and P. KOMAREK

CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

*2 Kernforschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, D-7500 Karlsruhe, FRG

Translation: Toshiyuki MITO, Yasuhiro MAKIDA, Hiromi HIRABAYASHI

National Laboratory for High Energy Physics, 1-1 Oho, Tsukuba 305

(Received December 14, 1987)

Synopsis :

A review is presented of the needs of large fusion and particle accelerator projects for advanced superconductors. The amounts of superconductors required and the materials are discussed.

1. ま え が き

核融合プラズマ磁気閉じ込め装置は、現在のところ超伝導電磁石の最も野心的な応用の一つである。プラズマ物理学の進歩は、短時間パルスによる純粋物理学の実験から連続運転による核反応実験へ切り替わる段階にまで達しており、それは次世代の実験装置の計画に表れている。このことは、最も進んだ磁気閉じ込め装置であるトカマクにおいてよく認識されているが、Next European Torus (NET), Fusion Engineer-

ing Reactor (FER, Japan), International Tokamak Reactor (INTOR, IAEA) の設計が進められており、十年後の完成を目指している。これらの設計を例にとれば、改良が進む超伝導体への条件と要求は明確であり、すでに開発のための努力が研究所および企業で行われてきている。タンデムミラー磁気閉じ込め装置に関しては、最近のローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) の MFTF-B 実験における大規模な超伝導電磁石系の運転成功によって、目覚ましい進歩が達成された。したがって、この装置についての超伝導体への要求事項は一応満たすことができたとして、新たな興味は、モデューラ・ステラレーターに移ってきており、この分野での初めての超伝導電磁石の設計が現在行われている。

超伝導電磁石の他の大規模な応用は、高エネルギー加速器およびコライダーに関するものである。現在、この種の加速器の一つテバトロン (Tevatron) が、米国、シカゴ近郊のフェルミ国立加速器研究所 (Fermi-

* 本文は Cryogenics, 27 (1987), 115-120 所載の論文を著者および出版社の許可を得て訳出したものであり、原著論文の受理月日は1986年8月26日である。

Translated and reproduced from G. Brianti and P. Komarek, Cryogenics 27 (1987), 115-120, by permissions of the authors and the publishers, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. ©.

lab) で実際に運転されており、固定標的実験用に800 GeV の陽子を取り出している。選択できるもう一つのモードとして、重心エネルギーが少なくとも、1,600 GeV 以上の陽子と反陽子の衝突実験を近い将来行うことができよう〔訳者注：陽子・反陽子衝突実験はすでに開始されている〕。この加速器は、口径が約7 cm で、全長が約6 km 磁場4 Tで運転される約1,000 個の超伝導双極及び四極電磁石から成っている。

同様の820 GeV 陽子リングが、西ドイツ、ハンブルグのドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)で、高エネルギー電子・陽子衝突実験用の Hadron Electron Ring Accelerator (HERA)¹⁾の一部として建設中である。この加速器は、1990年には稼働する予定であり、電磁石は4.7 Tで運転される。ソ連では、モスクワ近郊のセルプコフ研究所(Serpukhov)で周長20 km の固定標的実験用3,000 GeV 陽子リングが建設中であり、双極磁場は、約5 Tの予定である。これらのすでに進行中の計画に加えて、米国の物理学者たちは、非常に大きな陽子・陽子衝突型加速器 Superconducting Super Collider (SSC)²⁾について広範囲の開発研究を行っている。この加速器は、重心エネルギーで40,000 GeV の衝突実験を行うことができ、磁場6.6 Tの超伝導双極電磁石が使用される予定である。この場合リングは、約83kmの周長をもつことになる。

ヨーロッパでは、欧州合同原子核研究所(CERN)で、周長27 km の Large Electron Positron ring (LEP) のトンネルに、第二の加速器として、陽子・陽子(pp)および電子・陽子(ep)の衝突を行う Large Hadron Collider (LHC)³⁾の建設を考えており、この加速器は、10 Tの超伝導双極電磁石ができたとして、重心エネルギーが pp 衝突の場合17,000 GeV, ep 衝突の場合1,800 GeV になる。

2. 各種のプラズマ閉じ込め装置の超伝導 導体に対する制約条件

2.1 一般仕様

Fig. 1 は最も進んだ3つのプラズマ閉じ込め装置である、トカマク、タンデムミラー、モジュラー・ステラレーターのマグネット系を示している。Table 1 は主要な電氣的、機械的な制約条件について要約するとともにそれらの対策を示している。

それらの大部分は、導体の設計に関係しているが、少なくともその影響を受けている。所要の開発事項に

Fig. 1 Magnet systems of three major plasma confinement systems: (a) tokamak; (b) tandem mirror; and (c) modular stellarator.

ついてより詳細に述べるために、NET と INTOR トカマクを例としてとりあげる^{4,5)}。

2.2 トロイダル磁場 (TF) コイル用導体

Fig. 2 は、NET の TF コイル用導体設計の一つとして、カールスルーエ原子核研究所(KfK)で研究されているものを示している⁶⁾。導体での最大磁場は、ヌル・ダイバーター (null divertor) が一重か二重かの配置によって10.4から11.7 Tまで変化する。したがって、約11 T で電流密度を最適化した Nb₃Sn ストランドを用いなければならない。定格電流16 kA とするためには、このストランドをケーブル化しなければならないが、このケーブルは、A15導体の特性劣化を引き起こす過剰の曲げ歪みを避けるために、導体の曲げ

Table 1 Survey on required magnet parameters for tokamak, tandem mirror and modular stellarator fusion devices.

Constraint	Order of magnitude					Means
	Tokamak	Tandem mirror		Modular		
		Central cell solenoids	Yin Yangs	Axisym. solenoids	plug Stellarator	
Peak magnetic field	10-12T	6-8T	6-8T	12-25T	9-11T	Advanced superconductors plus normal conducting insert coils above 15T.
Current density in the winding	2-3 kA/cm ²	~1.5 kA/cm ²	~1.5 kA/cm ²	~2 kA/cm ²	1.5-2. kA/cm ²	Sophisticated cooling and stabilization technique
Transient a. c. field components (TF-coils), Pulsed operation	$\Delta B \leq 1.5T$, $\dot{B} \leq 1T/s$	-	-	-	-	Specific conductor design, efficient cooling and nonmetallic interfaces in the torus structure
(PF-coils) (OH-coils):	$\Delta B \sim \pm 8T$, $\dot{B} \leq 10T/s$					
EF-coils:	$\Delta B \leq 4T$, $\dot{B} \leq 2T/s$ $\Delta B < 0.2T$ with ~ 20 Hz					
Discharge voltage						
TF-coils:	1-10kV	1-10kV	1-10kV	1-10kV	$\leq 10kV$	High voltage design, especially of current leads
PF-coils:	$\geq 20kV$					
Nuclear radiation	γ 10^9 - 10^{10} rads n 10^{18} - 10^{19} cm ⁻²	10^9 - 10^{10} rads 10^{18} - 10^{19} cm ⁻²	10^9 - 10^{10} rads 10^{18} cm ⁻²	10^{10} - 10^{12} rads $< 10^{22}$ cm ⁻²	10^9 - 10^{10} rads 10^{18} - 10^{19} cm ⁻²	Selection of suitable materials, sufficient cooling for heat removal
Mechanical forces: in plane loads	stresses up to ~ 500 MPa					Careful design proven by finite element analysis; sufficient experimental material data base
out of plane loads	static ~ 200 MPa cycle ≤ 500 MPa	static ≤ 500 MPa	static ~ 500 MPa	static ~ 500 MPa	~ 200 MPa	
Large physical size: fabrication: linear dimensions (main diameter)	10~30 m	8~10 m	6~8 m	2 m	10~12 m	Fabrication methods suitable even for application on site

Fig. 2 One of the envisaged options for the conductor of the NET TF coils under investigation at KfK.⁶⁾

中性線近傍にストランドを配置しなければならない。さらに安定性を向上させるために銅を付ける必要があるが、その配置には、ポロイダル磁場の変動による渦電流を最小化し、断面積とヘリウム冷媒による濡れ周

長を最適化する工夫が必要である。KfK の設計では、反応後の Nb₃Sn ケーブルのまわりに銅を配置しており、この銅の側面は Nb₃Sn ケーブルを取り囲むCuNi バリアシートに半田付けして固定している。さらに、これらは、力の伝達と同時に冷媒用ヘリウムの濡れない圧力容器となるのに十分な厚みをもったステンレス鋼管中に入れられる。他のヨーロッパの研究所 (ECN, ENEA, SIN)⁶⁾ でも同等の設計が成されている。おもな相違点は、Al5導体とステンレス鋼管の間に入れる銅の安定化材の入れ方である。これらの導体の製作と特性試験は後で述べるように困難ではあるがやりがいのある仕事である。

2.3 ポロイダル磁場 (PF) コイル用導体

この導体に特有の制約条件は、パルス励磁が可能なことである。ただし、磁場の大きさそのものは、原則的に NbTi 導体で扱える範囲である。しかしながら、

Fig. 3 Conductor for tokamak poloidal field coils. Design under development by KfK.⁷⁾

高磁場導体の使用も望まれており、たとえば、オーミック・ヒーティング (OH) コイルでは、磁束を大きく振らせるのに役立つし、また、外側のリングコイルでは、より高い温度での運転が可能となり、結果として冷却チャネルの流路をより長くすることができる。PF コイル導体設計の原理は、KfK が企業との協力によって開発している型の導体から得られよう。これは、フランス CEA と共同で行っているプロジェクト、すなわち、フランス Cadarache のトカマク TORE SUPRA の常伝導の平衡磁場 (EF) コイルの一つを超伝導に置き換える計画で使用されるものである。このコイルを試験、運転することにより、次の NET PF コイルの設計製作技術が確立されるだろう。

Fig. 3 は、導体の設計を示している⁷⁾。10~20Hz の小振幅の磁場変動 (プラズマの位置制御) による連続的な熱負荷を取り去るため、He I の 2 相流を中央ダクトに流すことを予定している。Cu/CuNi 母材に NbTi フィラメントを埋めこんだ超伝導ストランドは、このダクトのまわりに 2 段階のケーブリングをされて配置される。ケーブル部全体は、流れのない He 中に浸してあり、速い過渡磁場変動 (プラズマ崩壊) による交流損失パルスに対して良い過渡熱伝達特性を確保している。ヘリウムの漏れない外側のステンレス鋼管は圧力容器および構造材として働く。

2.4 他の核融合電磁石システム用導体

Table 1 には、タンデムミラー装置およびより新しいモジュラー・ステラレーターでの要求事項が示されている。どちらの場合も、単純な直流運転であることが問題を簡単にしているが、平面状でない 2 軸の曲げをもつコイル形状 (ステラレーター、陰陽コイル) が制約条件を異なったものになっている。タンデムミラー実験に対しては、浸漬冷却の導体を用いた解決策が有効であることが証明されている。これは、LLNL の MFTF-B システム⁸⁾ に使用され成功したもので、システムとしてはすでにかなりな規模の大きさにまで達している。財政的な問題のため、次世代ミラー装置の開発計画は現在・将来とも不明である。

モジュラー・ステラレーターの場合は、西ドイツ Garching の IPP 研究所で、最初の常伝導システム Wendelstein AS が現在建設中である⁹⁾。この装置での実験およびそれによる物理の実験が成功すれば、ここ 10 年の終わりには、超伝導電磁石を使ったより大きなシステムの建設が始まることが期待できる。そのため、予備的な設計はすでに始まっている (たとえば、IPP とともに KfK で)。導体の設計はトカマクコイルよりもミラー用陰陽コイルに似たものになると考えられている。

3. 次世代の核融合プロジェクトの超伝導 導体需要見積

すでに述べたように、さまざまなトカマク計画は最もよく明確化されたシステムであり、NET 計画が、おそらく広範な国際的枠組みのなかでの事業として（たとえば、INTOR 活動と協調して）、承認されることは十分あり得ることである。したがって、NET/INTOR 設計からの数値は、このようなトカマク電磁石システムの需要を見積もるのに、代表的数値として

Table 2 Average percentages on the winding cross section of the different parts in a typical tokamak coil system (data taken from NET and INTOR designs.^{4,10})

Components	TF coil system	PF coil system
	Average percentage	Average percentage
Conductor	79%	68%
Superconductor	7%	3%
Stabilizer (Cu)	26%	14%
Barrier (CuNi)	3%	6%
Solder	4%	—
Steel	39%	45%
Coolant (He)	14%	21%
Insulation	7%	11%
Total	100%	100%

Table 3 Typical conductor amount for one NET/INTOR Tokamak.^{4,10}

TF coil system	
Composite conductor length:	$3.33 \cdot 10^9 \text{ Am}$.
with following component weights:	
Superconductor (mainly A15)	107 tons
Copper + solder	372 t
Steel	467 t
Total	946 tons
PF coil system	
Composite conductor length:	$2.0 \cdot 10^9 \text{ Am}$.
with following component weights:	
Superconductor (mainly NbTi)	8 tons
Copper + copper/nickel	55 t
Steel	170 t
Total	233 tons

使うことができる。

計画されている各種 TF および PF コイル用導体^{4,5)}の設計をよく見れば、超伝導材そのものの断面積に占める割合が非常に小さいことに気づかれると思うが、それが重要なことである (Table 2 参照)。強大な力のために、巻線の断面積の40%あるいはそれ以上は鋼材で占められ、15~20%は冷媒用の空間として確保しなければならないので、残りの部分だけが安定化材および超伝導材として使用できる。

設計はまた、コイル系に必要な導体の量を決定する。Table 3 には、Table 2 で与えられた導体要素の構成比率にしたがって、必要な量が示されている。見てわかるように、材料の量はかなり多く、世界中で行われている開発努力の裏付けとなっている。

最終的にどの材料が導体として使われるかという問いにはっきりとした答えはまだ出されていない。最もありそうな解としては、PF コイルの導体として NbTi、TF コイルの導体として Nb₃Sn を使うことが考えられる。しかし、他の A15 化合物や超流動ヘリウムで冷却した NbTi は TF コイルの解として可能である。また、すでに述べた理由によって、A15 化合物の PF コイルへの使用も考えられる。

Fig. 4 SC HERA dipole suspension.

Fig. 5 Cross-section of SSC.

4. 高エネルギー加速器／コライダーを実現するための超伝導導体の満足すべき条件

4.1 加速器用電磁石の一般的な特徴

加速器システムで最も重要な要素は、長い超伝導双極電磁石（数mから十数m）であり、ビームパイプがはめこまれた電磁石の軸と垂直方向の小さな口径（数cm）内に、一様な磁場を発生する。しかも、この磁場は、粒子が入射したときの低い磁場（通常最高磁場の1/20程度）から最高磁場まで立ち上げなければならない。この立ち上げ時間は、固定標的型加速器の場合は、比較的短く（約20秒）、同じビームが数時間もまわる衝突型加速器（コライダー）の場合は、もっと長く（10分あるいはそれ以上）することができる。

Fig. 4 は、典型的なコライダー用超伝導磁石の断面図として DESY の HERA 陽子リングの長さ 9 m の超伝導双極電磁石を示している。このタイプの電磁

石の磁場は、5～10Tの範囲が考えられている。

コイル内の電磁力は非常に非対称であり、水平方向に膨らもうとする力は、5,000kN/m にも達し、コイル内の応力は 100MPa 以上となる。

口径内の磁場分布に要求される精度および各電磁石間に要求される均一性は非常に高く、すべての磁場領域において多極成分が 10^{-5} 以下となる値である。巨大な加速器あるいはコライダーでは、数百から数千の同じ要素機器が必要である。最も極端な例は SSC で、Fig. 5 に断面を示した長さ 17m の長い超伝導双極電磁石が8,000 個製作され、周長約83km の丸いトンネルに2つのリングとして並べられる。LHC では、two-in-one 設計（ビームは反対方向にまわる）に基づいた長さ10m の超伝導双極電磁石が1,800個作られる予定である（Fig. 6 参照）。

4.2 超伝導導体の仕様と形式

定格最大磁場での電流密度をできるだけ高くするこ

Fig. 6 Cross-section of LHC, 10T, twin-aperture dipole (2K version).

Fig. 7 NbTi superconductors for dipole magnets (US vendors). Δ , Supercon; $\blacktriangle$, Supercon (fine filaments); $\square$, IGC; $\blacksquare$, IGC (fine filaments); $\circ$, OST.

とがこのような小口径の電磁石では、最も重要である。一方、磁化電流によって生じる多極成分の誤差を少なくするために、超伝導素線のフィラメント径は小さいほど良い(数 μm)。

一般に、コイルを巻くために使われる導体は、数十本のストランドを適当なケーブルピッチで撚り合わせ、円柱の開口部の上への巻線が容易なように台形状に成型されている。

広く使用されている超伝導材の種類は NbTi であり、これはおもに、機械的な性質の良さ、すなわち、小さな曲げ半径でコイル巻線しても短尺試料と比べて特性の劣化がないかあってもごくわずかであることから使われている。ごく最近の 5 T, 4.2 K の臨界電流密度 (J_c)¹⁰⁾ の値が Fig. 7 に示されている。これ

Fig. 8 J_c of Nb₃Sn and Nb₃Al (present average data). —, Nb₃Al (≈ 80 nm); ///, alloyed Nb₃Sn (≈ 120 nm).

は、NbTi 線材の工業生産で得られた値である。同じような結果が世界の別の国でも工業的に得られている。1980年代最初の Tevatron の頃に比べて、 J_c が約50%も改良されていることは注目に値する。

A15 導体、とくに Nb₃Sn と Nb₃Al は J_c の面で進歩してきている (Fig. 8 参照)。

最近、Nb₃Al では $1,900\text{ A/mm}^2$ の臨界電流値が報告されている¹¹⁾。しかしながら、これらの線材を加速器用超伝導電磁石に使用するために克服しなければならないおもな障害は、機械的な脆さであり、一般的には、反応後の線を長く細いコイル状に巻くのは困難である。しかし、10 T 以上の高い磁場と 4.2 K の条件で、高い J_c を得ることができるのは魅力であり、上述した問題を現実的な方法で解決する努力が今後さらに払われてしかるべきである。4.2 K の Nb₃Sn と 1.8 K の NbTi を比較すると、10 T でほぼ同じ J_c 値を示す。したがって、前者の困難な巻線と容易な低温技術と後者のその逆の難易性の間にトレードオフがされなければならない。

5. 次世代の加速器プロジェクトの超伝導導体需要見積

HERA 陽子リングに必要な NbTi 超伝導導体の総量は 110 tons である。準備中の計画について、将来はどうであろうか。ここ 8 年から 10 年のうちに、米国では、SSC が約 2,000 tons の NbTi 導体を必要とし、ヨーロッパでは、LHC が約 1,200 tons の同じ導体を必要とする。しかし、これらの 2 つの計画が同時に行えるとは考えがたいことは注意しなければならない。

現在のモデルやプロトタイプおよび初段階の電磁石の研究開発には、最終的な量の数%が必要である。

6. 結 論

高度に進歩した超伝導電磁石システムを必要とする巨大計画が、次の 10 年の間に核融合研究と素粒子物理研究の両方の分野で予定されている。これらは、莫大な量の進歩した超伝導導体を必要とし、世界的規模で産業界の奮起を促している。核融合では、NET/INTOR 級の装置の建設に、超伝導材、安定化材、補強用の鋼材からうまく作り上げた導体が 1,200 tons 必要である。素粒子物理では、2, 3 の巨大な加速器リングが計画されており、数千個の超伝導双極および四極電磁石の建設に 1,000~2,000 tons の超伝導線が必要である。これらの計画に対する超伝導導体および超

伝導電磁石技術の開発は研究所で企業との協力によって進められている。この技術は、これらの計画の実行時に、計画のもつ困難を克服するために役立つであろう。

参 考 文 献

- 1) B. H. Wiik: IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-32** (5) (1985) 1587
- 2) M. Tigner: IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-32** (5) (1985) 1556
- 3) CERN Machine Group: IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-32** (5) (1985) 3436
- 4) NET-Status Report, Euratom NET Report 51 (1985)
- 5) International Tokamak Reactor (INTOR): Phase 2A, Part I & II: IAEA-Panel Proc Ser (1984, 1986)
- 6) R. Flükiger et al.: KfK 3973 (1985)
- 7) U. Jeske and C. Schmidt: 14th SOFT (1986)
- 8) T. A. Kozman, S. T. Wang, Y. Chang, E. N. C. Dalder et al.: IEEE Trans Magn (1983) **MAG-19** (1983) 859
- 9) J. Sapper, U. Brossman, G. Grieger, J. Kisslinger, S. Mukherjee, F. Sombach and H. Wobig: 12th SOFT (1982) 161
- 10) R. Scanlan, A. F. Greene and M. Suenaga: ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics (May, 1986) 51
- 11) S. Ceresara: ICFA Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics (May, 1986) 143