

超伝導電磁石の開発

高エネルギー物理学研究所

細山 謙二
土屋 清澄

はじめに

超伝導技術の高エネルギー物理学への寄与が近年増大し、もはや超伝導技術を無視して高エネルギー物理学実験を行なうことが不可能となって来ている。陽子シンクロトロン の加速エネルギーの増強用に加速器用の超伝導電磁石の開発が精力的に行なわれて来た。KEKでも TRISTAN 計画 phase II¹⁾ (電子-陽子衝突型加速器)の陽子リングに超伝導電磁石の利用が考えられ、その開発が行なわれているが、米国のフェルミ国立加速器研究所(FNAL)では既に直径 2km の巨大な超伝導陽子シンクロロンが完成し稼動している²⁾。これらの超伝導技術の完成も背景に米国では、約10年後の完成を目標に 20TeV x 20TeV の陽子-陽子の衝突型加速器「Superconducting Super Collider」 「SSC」計画³⁾が急速に浮上して来た。同様に日本でもポスト TRISTAN 計画として 30TeV x 30TeV の陽子-反陽子の衝突型加速器計画 JSP計画⁴⁾が真剣に議論されている。

超伝導電磁石の開発の現状の簡単な紹介の後で、JSP 計画用の超伝導電磁石及び KEK で研究開発されている 10T 電磁石について議論する。

SSC 計画 (20TeV x 20TeV) 用 超伝導電磁石

約10年後の完成を目標にしている為、約3~4年のR&Dの後には本格的な超伝導電磁石の量産ラインを完成させ、その後の数年で大量生産を行なう必要があるということ超伝導電磁石の磁場強度として 3T, 5T, 6T, 8T の場合が考えられている。(表1参照)

3T の場合は、超伝導電磁石の持つ、経済性と鉄芯を積極的に利用する常伝導電磁石の磁場精度が鉄芯の位置精度だけに依存することにより高精度の磁場が得られるという特徴を合せ持つ。いわゆる「super ferric magnet」⁵⁾である。磁場強度が弱いことにより、20TeVの加速器を実現する為には直径約50kmの巨大なリングが必要となるが、磁場が低いことにより、線材は能力に充分余裕があり、コイルの製作上の向題もなく、量産化及び安定な運転が比較的容易に実現出来ると考えられている。

5T の場合は FNAL で現在稼動中の Energy Doubler (直径2kmの陽子シンクロトロン) で完成された技術の延長線上⁶⁾にあり、超伝導コイルを取り囲む鉄芯は、鉄芯が約2Tで磁気飽和することを考慮して、コイルから遠く離れた所で単に磁気シールドの役目をするだけである。この結果線材の位置精度が直接磁場精度を決定することになる。

6T の場合は、超伝導線材として完成の

SSC Magnet (20Tx20T)

a.	3T	NbTi	Texas
b.	5T	NbTi	FNAL
c.	6T	NbTi	LBL } collaboration
d.	8T	+1.8K	
e.	8T	Nb ₃ Sn	BNL }
f.	8T	Nb ₃ Sn	LBL

域にある NbTi の成形捲線を用いた、2層のシェル構造をもち、Energy Doubler の完成により、その優秀性が証明された 5Tクラスの超伝導電磁石を基本に、有効断面積を必要最少限に小さくし、経済性及び蓄積エネルギーを小さくする様設計したもので、大きな技術開発を必要とせず実現可能と考えられている。

8Tの磁場を仮定するとリングの直径は約20kmとなり、トンネルの建設及びトンネルの巨大化に伴う問題を避けることが出来る。ところが、現在、最も信頼性があり、実用性の高い NbTi 線材は高磁場で性能が低下して 8T用コイルに使用することが出来なくなる。NbTi 線材を使用して高磁場を得る方法として、冷却温度を 4.4°K から 1.8°K (超流動ヘリウム状態) に下げて NbTi 線材の高磁場特性を改善する方法が考えられているが、巨大な超伝導リング全体を超流動ヘリウムに冷却する経済性及び超流動ヘリウム特有のスーパリーフに關する問題点が指摘されている。ところが、化合物超伝導体である Nb₃Sn を線材に使用すれば、その高磁場特性が優れていることにより、4.4°K で充分その性能を引出すことが可能となり、8T以上の高磁場電磁石用の線材として最も有望な線材である半面、化合物線材特有のもろさの問題があり、多くの製作上、解決しなければならない技術的な問題がある。

以上の各タイプの電磁石のどれを採用するかをすぐに決定することが出来ないので、今後約3年程度のR&Dを通して、その建設地を含む加速器の全体計画を考慮して決定されるということである。

JSC 計画 (30 TeV x 30 TeV) 用 超伝導電磁石

JSC計画⁴⁾では、直径30kmのリング内に陽子-反陽子を30TeVまで加速、蓄積する、その際偏向電磁石に要求される磁場強度は9Tと高磁場である。表2は偏向用のヌヌ極電磁石と収束用の四極電磁石のパラメータを示す。

表2. JSC 計画用超伝導電磁石
主要パラメータ - 一覧

JSC用超伝導電磁石の設計に際して次の点に留意して設計を行なう必要がある。

- (a) 構造が単純で強い電磁力下で線材の動きを確実に止めることが出来る構造にする。
- (b) 量産化が可能であること。
- (c) 生産コストが低い → 超伝導線材の使用量を出来るだけ少くする。
- (d) 熱負荷が低いこと。

上記、各条件を満足する、超伝導電磁石の設計例とその特徴を示す。(図1参照)(表3, 参照)

Dipole	
field strength	9T
length	10m
number	7680
Quad.	
field gradient	200T/m
length	7m
number	1280

JSC 10 T Dipole Magnet Design

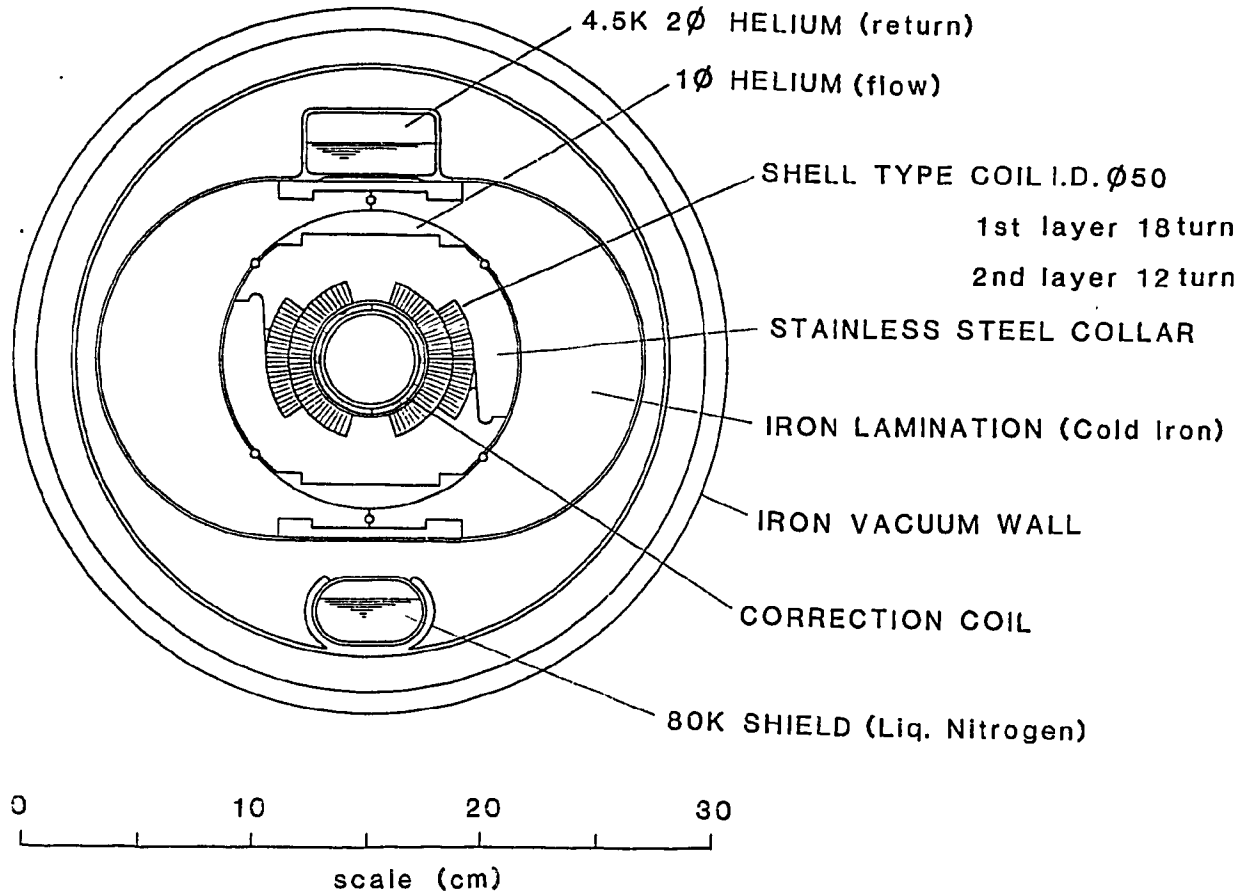


図1 JSC 計画用 10T ダイポール 断面図

表3. JSC 計画用 10T ダイポールの 特徴 及び 超伝導線材 主要パラメーター

A.	Nb ₃ Sn, NbTi-1.8K	
B.	Shell Type, 2-layer	超伝導線材 主要パラメーター
	note: High Current Density Wire	10 ^{mm} x 2 ^{mm}
C.	Cold Iron, Cold Bore	I _c = 13KA at 10T
		J _c = 60KA/cm ²
D.	High Current Wire	
E.	Self-correction Coil?	
		KEK TRISTAN (例) 5T ダイポール
		10 ^{mm} x 1 ^{mm}
		I _c = 5.5KA at 5.5T
		J _c = 45KA/cm

§ 線材 Nb_3Sn か $NbTi$ + 1.8K か?

現在、 $NbTi$ 線材を 4.4°K で冷却して使用する場合の実用的な超伝導磁石では有効平均電流密度は 5T 領域で約 $50KA/cm^2$ である。使用する超伝導線材を出来るだけ少なくし、しかも蓄積電磁エネルギー、電磁力、コイル質量を小さくする様にコイル径を小さく設計する事により、製作コストを下げる事が出来るが、この場合、磁場強度は電流密度に依存して決定されてしまう。10T 領域の超伝導磁石を完成させる為には有効平均電流密度 J_{cav} 約 $60KA/cm^2$ at 10T の線材が必要となる。(表 3 参照)

10T 領域で高電流密度を実現する線材として、 Nb_3Sn 線材が最も有望な線材であるが、化合物線材特有のもろさの問題があり、多くの解決しなければならぬ技術的な問題点がある。

一方 $NbTi$ 線材を 1.8 K に冷却して、電流密度を高くして使用する⁷⁾方法がある。この場合コイルの製作技術は 5T; $NbTi$ 磁石で開発した技術の延長線上にあるが、1.8K 超流動ヘリウムを使用する為には、それに特有なスーパリーク対策及び冷却効率の低下、冷却システムの複雑化等の問題があり巨大な加速器システムに採用しにくい。

§ 2層の SShell タイプ構造

超伝導磁石のコイルの形状として、Shell 型、ブロック型、ウインドフルム型等が製作されている。その中で、2層の SShell 型コイルは FNAL で Energy Doubler/Saver 用として、精力的に開発研究が行なわれ、Doubler の完成によって、その優秀性が証明され、5T 領域の超伝導磁石として完成の域に到している。電流密度のあまり高くない超伝導線を使用すると、高磁場を実現する為には、Shell の層数を増す必要がある。⁸⁾この場合、磁場中心から離れた所に線材を配置することになり、中心磁場の増加への寄与は小さくなり、その結果、使用線材の量が飛躍的に多くなる。その結果、コイルの製作がたいへんになり、励磁中にコイルに働く強い電磁力を支えるカラーの構造が複雑になるだけでなく、コイルに貯えられる電磁エネルギーの量が増大する。即ち、実用的な

図 2. Nb_3Sn と $NbTi$ 線材の特性
(Ref. 13 より引用)

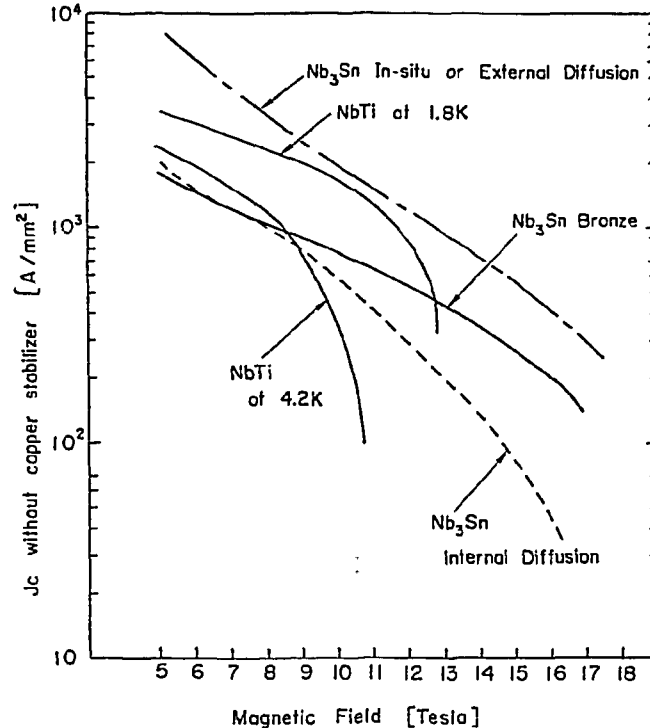


Figure Current Densities versus Magnetic Field in Nb_3Sn and $NbTi$ Superconducting Wires (Each line shows the upper limit in 1981.)

2層shellタイプの高磁場電磁石を製作するには、高電流密度の熱収が必要となる。

§ Cold Iron, Cold Bore

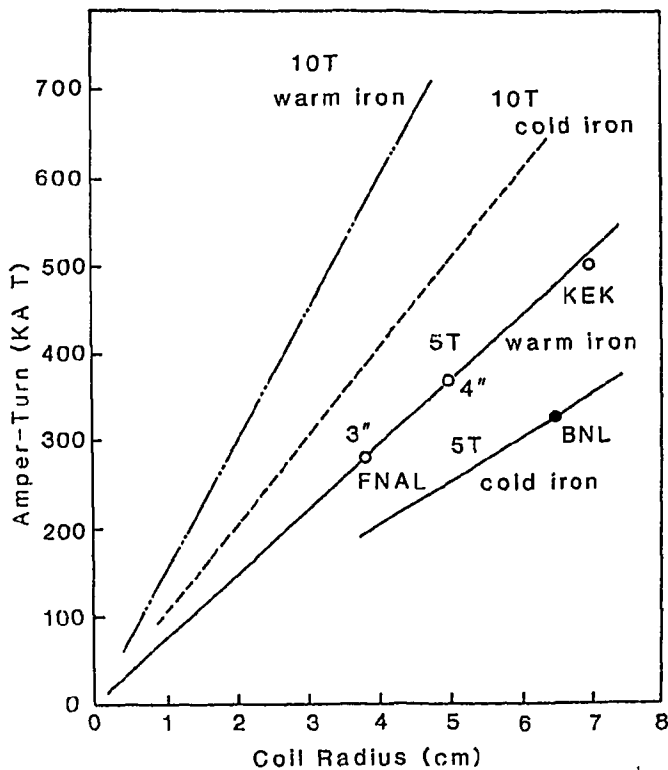
Cold Iron タイプでは、磁気シールド用の鉄芯をコイルと一緒にヘリウム温度に冷却する。その結果、低温質量は増大し、クールダウンやウォームアップに長時間を必要とするが、強力な電磁力は鉄芯内に閉じ込められるので、鉄芯コイルを収納するヘリウム槽のサポートはヘリウム槽の自重だけを支えれば良く、断熱特性を上げることが可能となる。ビームパイプが室温の Warm Bore タイプでは、ヘリウム槽との間を断熱層として利用する必要があるが、十分な断熱スペースを確保することは不可能であり、完全な断熱特性を期待することが出来ない。これに対し Cold Bore タイプでは、この心配が全くない。

§ Correction Coil — Self Correction Coil —

通常、超伝導電磁石では、コイルを取り囲んでいる鉄芯は、鉄が約2Tで磁気飽和することを考慮してコイルから遠く離れた所で、単に磁気シールドの役目をしていただけである。これは常伝導電磁石(最高約2T)の場合、鉄芯を積極的に利用しているのと大いに異なる点であり、電磁場は超伝導線内を流れる電流分布により直接作られている。その結果、線材の位置精度が直接磁場精度を決定することになる。加速器用の電磁石に要求される磁場精度 $\Delta B/B = 10^{-4}$ 以上にするためにはコイルの位置精度を0.05mm以下にする必要がある。図3. 必要な巻線数とコイル内径の関係

Self correction coil は、4重極、6重極等の誤差磁場を補正する超伝導4重極、6重極補正コイルを内側に、ビームパイプの外側に配置する。各補正コイルは誤差磁場の対応する磁場成分をピックアップして、それを打ち消す電流が補正コイル内に流れ誤差磁場を補正するというもので比較的簡単な補正コイルで効率良く補正することが可能である。通常の補正コイルでは外部から電流を供給し補正する必要があるのが多くの磁石を各磁石の個性に合わせて補正するのはたいへんであるが、この方法では各磁石が自動的に補正するのでたいへん手軽である。

Self Correction Coilの採用によ



り、超伝導電磁石の磁場精度を1桁上げることは比較的簡単であるので、高い磁場精度を必要とする加速器用の電磁石に利用出来ると考えられる。

電磁力、貯蔵電磁エネルギーの問題

超伝導電磁石が安定に動作するには、励磁中にコイルに働く強い電磁力に耐える構造を持つことが重要である。コイルに働く電磁石の強さを表わすパラメータとして、コイルを横方向に引き離す力 F_B (Bursting force) を考えると、 F_B はコイルの内径の乗数で表わされる。(図5参照)。今までに計画、製作された超伝導電磁石に働く電磁力(磁場強度と領域)と、今回計画しているコイル内径 $\phi 5\text{cm}$ の超伝導電磁石(10T, 矢印)に働く F_B を示す。10Tの高磁場電磁石は5T電磁石の約4倍の電磁力が働くがコイル径を小さくすることにより、小さく抑えることが可能となる。KEK TRISTAN phase II用の超伝導電磁石を1.8Kに冷却し、超伝導線材の性能を改善することにより6.75Tまで励磁することが出来た¹⁰⁾。その時の電磁力 F_B は約4 ton/cmと今回計画している10T超伝導電磁石(コイル内径 $\phi 5\text{cm}$)の約3.3 ton/cmよりも大きな力がかかったことになり、現在のコイル製作技術の延長線上で強い電磁力に耐えるコイルが製作可能と考えられる。

超伝導電磁石が励磁中に何らかの原因でクエンチ(常伝導状態になる)した場合、コイル中に貯えられていた磁場エネルギーはジュール熱としてコイル中に

図4. コイル内径と蓄積エネルギーの関係

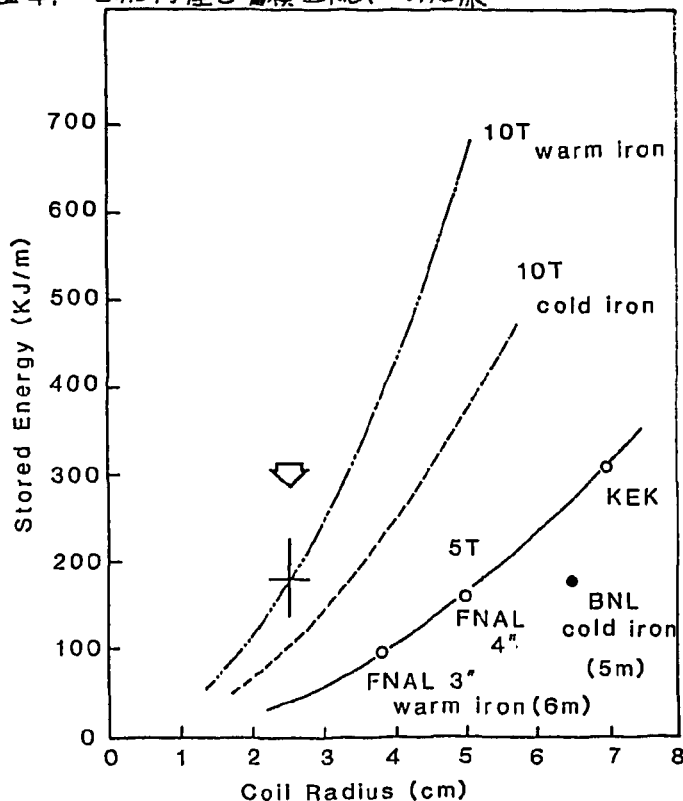
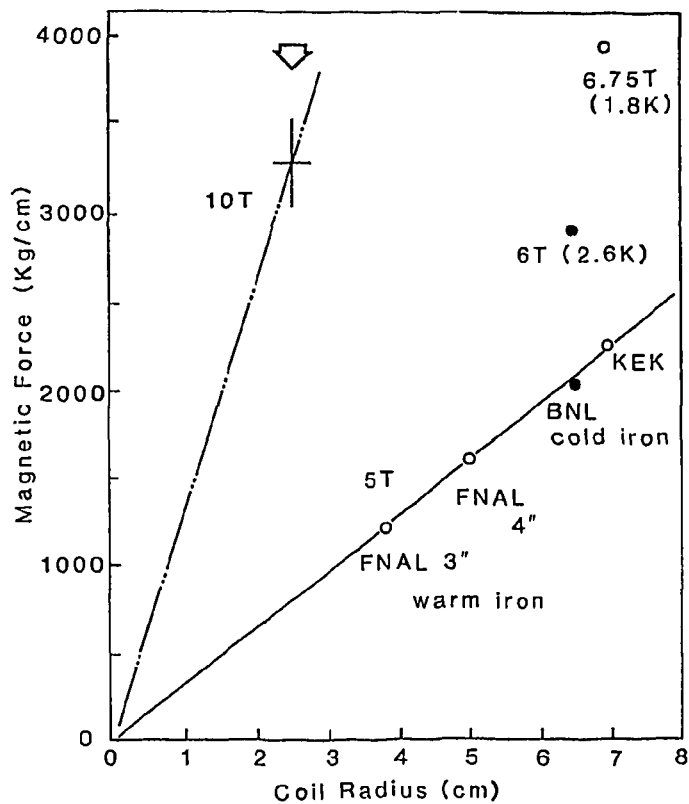


図5. コイル内径と電磁力(Bursting力)の関係



一部は放出されるが、大部分を外部に取出す必要がある。クエンチの際のコイル内の蓄積エネルギーの処理が不適切であるとコイルを損傷することになる。図4に、今まで計画、製作された超伝導電磁石の単位長さあたりの蓄積エネルギー U_s をコイル内径の円数として表わしてある。蓄積エネルギー U_s はコイル内径の自乗に比例して、又、磁場強度の自乗に比例して増加する。(線材の中、Cold IronタイプがWarm Ironタイプがによって多少変化する) 今回計画中の電磁石はコイル内径を小さく設計したので U_s を約200kJ/mとFNALのDoubler用電磁石の約2倍、BNLのCBA計画用の電磁石とほぼ同じ大きさと、小さく抑えることが出来、現在のクエンチプロテクション技術の延長線上の技術でクエンチ対策を行なうことが可能であると考えられる。

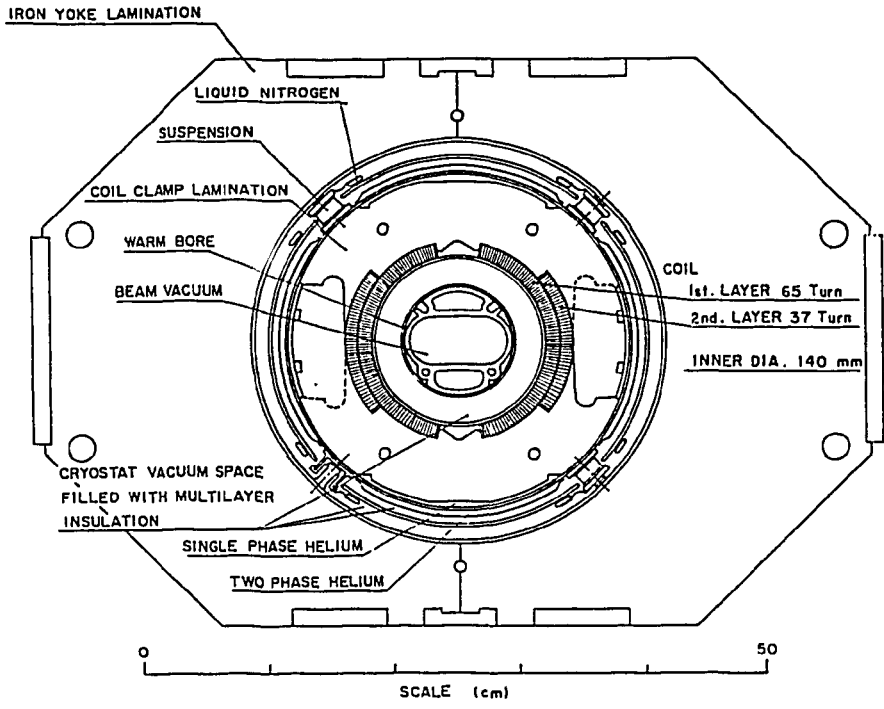
KEK に於ける超伝導電磁石の開発の現状と計画

TRISTA計画 phase IIで使用する中心磁場5Tの超伝導電磁石の開発が行なわれて来た。¹¹⁾ 超伝導線材にNbTi 成形撚線を使用した2層のシェル構造をしており、コイル内径がφ14cmと大きいことを除いて、FNALのEnergy Doubler/Saver用超伝導電磁石と、ほぼ同じ形状をしている。図6にこの超伝導電磁石の断面積を示す。(参考の爲に、KEK-TRISTAN, FNAL-Doubler, SSC, JSCの各超伝導電磁石の主要パラメータを表5に示す。) コイル長約1mのモデル電磁石3台の試

作を通じ、製作技術を確立したのち、全長約5mのプロトタイプ1台を完成している。

将来の超大型加速器用の10T超伝導電磁石として、現在高エネルギー研では、NbTi + 1.8KとNb₃Smの2つのタイプの電磁石の開発研究が行なわれている。これらの研究開発状況について簡単に記述する。

図6. TRISTAN プロトタイプ ダイポール電磁石



(a) NbTi + 1.8K¹²⁾

有効径φ6cm, 全長約1mのモデル電磁石が完成し、近いうちには冷却、励磁テストを行なう予定である。コイル形状は基本的にはレスラック形をしたウィンドフルーム型をしており、強い電磁力下でのコイルの動きを抑える為、コイル固定カラーの構造に工夫がこらされている。図7にコイルの断面形状の様子を、表5に電磁石の主要パラメータを示す。

表4. 代表的な超伝導タイプール電磁石の
主要パラメータ一覧

	FNAL Doublor	KEK TRISTAN	U.S.A SSC	JAPAN JSC
Conductor	NbTi	NbTi	Nb ₃ Sn or NbTi-1.8K	
Coil Shape	Double Shell	Double Shell	Double Shell	Double Shell
Coil I.D.(mm)	76.2	140	40	50
Bend Field (T)	4.3	5.0	8.0	9.0
Stored Energy (KJ/m)	65	310	120	180
Coil Length (m)	8	5	20	10
Ring Dia (Km)	2	1	20	30
Energy (TeV)	1	0.35	20	30

図7 NbTi + 1.8°K 10T ダイポール断面図

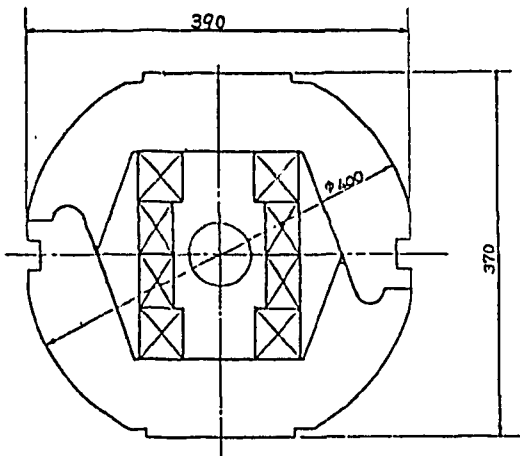


表5 NbTi + 1.8K 10T ダイポール主要パラメータ
(Ref.12 より引用)

Table .. Parameters of 10T NbTi/Cu dipole magnet
cooled with superfluid

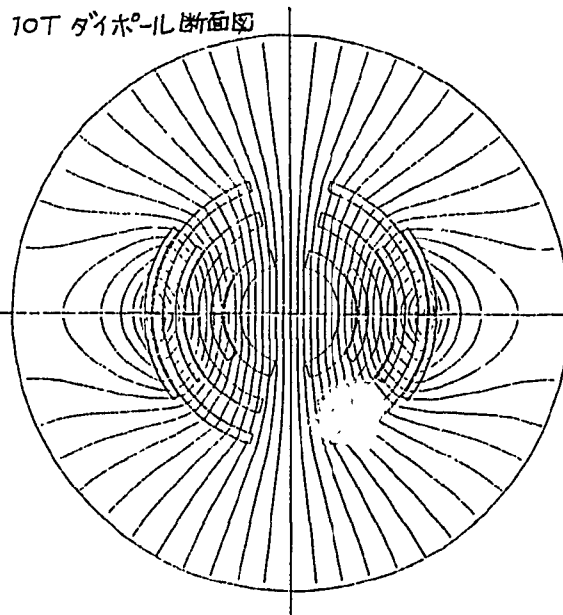
Central field	10 T
Max. field in the coil	10.7 T
Useful aperture	60 mm
Field homogeneity in the useful aperture	$\Delta B/B = 5 \times 10^{-4}$
Operating current	5000 A
Overall current density	32,700 A/cm
Stored energy	896 KJ
Inductance	72 mH
Length of magnet	1000 mm
I.D. of the iron shield	460 mm
O.D. of the iron shield	800 mm
Total bursting force	635 ton
Total compressive force at mid plane	142 ton
Conductor size (monolithic) material	Nb/Ti/Cu
copper ratio	1.0
Insulation	Kapton

(b) Nb₃Sn タイプ¹³⁾

化合物線材が持つ、宿命的な、線材
がもろくて、コイル巻線がむづかしいと
いう欠点にもかかわらず、臨界温度T_c
と臨界磁場H_cがNbTi線材に比べて
高いという、優れた特性に注目し、将
来の高磁場電磁石の最有力候補として
開発が行なわれている。

モデルコイルはコイル 図8. Nb₃Sn
内径φ5cmのシェル構造 10T ダイポール断面図
で、Double shell 3ヶを
合成して10Tが得られ
る様になっている。

線材としてブロンズ法
(Bronze Processed)
のモノリス(monolithic)
線材を採用し、コイル巻線
後約720°Cで約50時間の
熱処理を行なう、いわゆる
Wind & React法を
採用している。



TOTAL TURN	192
CURRENT	5160 A AT 10 T
STORED ENERGY	959 KJ/M
BURSTING FORCE	
N = 1	11 TON/CM
N = 2	4.3 TON/CM
N = 3	14 TON/CM
N = 4	3.5 TON/CM
N = 5	8.7 TON/CM
N = 6	-1.9 TON/CM
TOTAL	40. TON/CM

表6に使用した線材の主要パラメータを示す。ニエルタフのモデル電磁石の製作に先立ち、単層のL-ストラック2台(L=15cm, l=80cm)を試作し、熱処理、絶縁等に關する製作技術も確立した。¹⁴⁾ 現在、内径13cm, 全長約80cmのダブルニエルタフのコイルが製作されている。

Table 1. Parameters of large current bronze processed monolithic Nb₃Sn stabilized cable

Critical current at 10T and 4.2K	5,000 A
Cross section of monolithic cable	13.8 mm ²
Number of filaments	113,000
Filament diameter	5 μm
Twist pitch	245 mm
Copper fraction	53.8 %

表6. Nb₃Sn 10Tダイポール用

(Ref.14より引用) 超伝導線材主要パラメータ。

(c) 最後は

(a), (b)で議論した, 現在とEKで開発研究が進められている10T電磁石では, 線材の電流密度が充分高くとれないので, 必然的に多くの巻線が必要となり, 大型かつ複雑となる。その結果, 製作費が上がることになる。即ち巨大加速器に使用される高磁場超伝導電磁石の開発には, コイルの製作技術やクライオスタットを含む低温技術の開発研究の他に, 高電流密度の線材の開発研究が必須な条件と考えられる。近い将来に10T級の高磁場加速器用電磁石を完成させる為には, 高電流密度線材の開発研究に早急に着手する必要があると考えられる。

参考文献

1. 高エネルギー物理学研究所加速器拡充計画 一トリスタン I の設計研究 昭和55年7月
2. Status of The Energy Saver J.R. Orr, IEEE NS-30, August '83, Fermi News
3. Report of the 20TeV Hadron Collider Technical Workshop Held at Cornell, March 28, 1983
4. 「30TeV級FP Collider 加速器に關する考察」 鈴木, 横谷, 平田, 陳, 塚本, 尾高, 渡辺, 岩崎, 近藤 1984
5. Super-ferric Supercollider Reference Design Texas, March 21, 1984
6. A Report on the Design the Fermi National Accelerator Laboratory Superconducting Accelerator FNAL, May, 1979
7. A Four Layer, Two inch Bore Superconducting Dipole Magnet, W.V. Hassenzahl et. al. IEEE Mag, 19, 1983
8. High-Field Superconducting Accelerator Magnets, C. E. Taylor et. al. ICEC9, May 1982
9. Self-Correction Coil Operation Mechanism of Self-Correction Coil
K. Hosoyama LBL-16304, UC-20b, 1983
10. A NbTi Superconducting Dipole Magnet Installed in a Pressurized Helium II Cooling Bath
K. Hosoyama, J. Kishino, T. Kōrikū, N. Kudo, T. Kubo, A. Yamamoto, H. Hirabayashi, S. Mitsumobu, I. Sakai, Y. Suzuki, K. Tsuchiya
JJAP, 67(2), No. 12, 1982
11. Test Dipole Magnets for the TRISTAN Superconducting Proton Ring. IEEE NS-28, No. 3, 1981.
S. Mitsumobu, K. Hosoyama, A. Yamamoto, J. Kishino, T. Kudo, H. Hirabayashi, Y. Kimura, H. Hirabayashi, M. Kobayashi, T. Shimotani June 1981
12. A Design Proposal For High Field Dipole Magnets, K. Tsuchiya, M. Wake, and T. Mito. ICEKBI-1, AE 1981
13. Multi-shell Coil and Graded Conductors in High Field Dipole Magnet, H. Hirabayashi, ICFA Workshop 1981
14. A Single-Layer Race-Track Magnet Using a Niobium-Tin Conductor
T. Mito, K. Tsuchiya, K. Hosoyama, S. Mitsumobu and H. Hirabayashi, Adv. Cryo. Engineering, Vol. 29, 1984.