超電導トロイダルコイル分割可能性についての検討

桂 井 誠

(東京大学・工学部)

(昭和55年10月6日受理)

The Application of Splittable Superconducting Coils to the Toroidal Type Fusion Reactors

by Makoto Katsurai

(Received October 6, 1980)

Abstract

Various crucial design issues associated with the maintenance and repair of superconducting toroidal magnets in the commercial grade fusion reactors can be solved by providing toroidal coils with the practical splittability which enables *in situ* assembling and disassembling of whole Magnet systems without moving radiation shields. In this paper, based upon the D-shaped disk type coil with cold reinforcements for magnetic forces proposals for practical configurations of joints and Dewar vessels are made, and their technological features when utilized in Tokamak reactors are discussed.

要 旨

トラス型核融合炉の組み立て・分解修理等を容易にするため、それに使用される超電導トロイダルコイルの分割法についての検討を行なった。その結果、コイルユニットに多層のディスク型巻線支持構造を採用し、ディスクの分割・接続部構造に特別な工夫を加えることにより、組み立

Department of Electronic Engineering, University of Tokyo

て、分解作業が比較的容易で、機械的強度および接続によるジュール発熱の大きさとも、十分実用に耐えるものが設計可能であることが判明した。

§ 序

トカマク炉あるいはステラレタ炉等、トラス型核融合炉を実用化するにあたっての工学的問題点の一つとして、マグネット系の構造・構成上の複雑さが指摘されている。特にトカマク炉のボロイダルコイルおよびダイバーターコイル、ステラレタ炉におけるヘリカルコイル等は、もしそれ等が超電導コイルで製作され、かつトロイダルコイルの内側に設置されることが要求される場合、その組み立て、取りはずし等の作業には多くの困難が予想される。銅マグネットの例ではあるが、今日運転されている中型のトカマク装置のなかで、特に米国のPDX, Doublet III等の非円型プラズマ装置はトロイダルコイルが分割可能な構造を有している。また原研で一時検討されていたJT-IV装置も同様な分割構造を前提としていた。^{〔1〕} しながら、今日建設中の大型トカマク装置(TFTR, JT-60, JET)はいずれも分割型コイルの採用は行なわれていないし、また将来トロイダルコイルが大型化し、かつ超電導化した場合、巨大な電磁力および接続部での発熱等を考慮すると分割型コイルの実現はそう容易なものではないと考えられている。そこで多くの概念設計をみると、トロイダルコイルは非分割型とし、炉の分解・修理の方に色々な工夫をこらしている。

典型的な炉の分解法としてよく採用されるものは、コイルユニットとブランケット部をモジュール化し、分割セクターを外側へ搬出しようとするものであるが、^{〔2〕} この場合、一つのモジュールの重量は数千トンにもなるので、実際問題としてその切断、搬出等は、大変な作業になるものと予想される。また、DT燃焼実験が開始された後はブランケット部は強く放射化されてしまうであろうから、単にコイル部分のみを取りはずすのにも、遠隔操作でブランケット部を引き出さなくてはならず、その現実性に問題が多い。特に超電導ダイバーターコイルをトロイダルコイルの内側に設置することは、これでは不可能であろう。他方、核融合・核分裂ハイブリッド炉において複雑なブランケットの信頼性を向上させるには、ブランケット部が固定された状態で修理・点検とか(分裂性)燃料装荷が可能なよう設計すべきであって、この観点で超電導トロイダルコイルを分割可能とすることが技術開発は困難とは言え、正攻法と思われる。その開発に成功すれば、シールド内部の放射化されたブランケット部とその外側のコイル系とを構成上分離することができ、特に、コイル系に対する各種の修理・交換等の作業は、シールド壁外側の立入可能空間内で

超電導トロイダルコイル分割可能性についての検討

実行可能となる。

以上の観点から、米国BNLのPowell等はDEALマグネットなるアイディアを提案している。^{〔3〕} DEALマグネットの思想は第1図(A)に示すようなもので、その特徴は以下の点

FIG. 1

Fig. 1 Constructions of toroidal magnet with splittable superconducting coils

である。(なお同図は二分割についての例であるがDEALマグネットにおいては4ないし6分割とし、各セクションは直線状の構造としている)。

- (1) 超電導線には巾広の帯状構造を使用し、その電流容量は200～300KAと大きくとってある。一つのユニットはこの帯状導体を横方向に絶縁物を介して重ねて作る。
- (2) 導体接続は「はめ込み方式」とし、接触抵抗は横方向から圧力を加えることによって下げる。
- (3) 導体に加わる電磁力は、導体の外周に沿って設けた絶縁物で受け止め、それを常温空間の支持構造物に伝える。

等である。この方式は種々の利点と同時に以下のような問題点を有す。

- (1) 大電流容量導体の開発に伴う問題、特にその製造法、電磁気的特性、リード線部での熱侵入、ポロイダル磁界による渦電流発熱等に問題点を有す。
- (2) 導体支持用絶縁物を通しての熱侵入が大きい。
- (3) 超電導体間の機械的接触で、接続抵抗がどれ程低くできるか不明。
- (4) トロイダルコイルの外側に補強用の構造物が大きく張り出していて邪魔になる。

ところで、最近のINTOR関係のレポート^{〔4〕}において、分割型超電導トロイダルコイルに

対しては、接続抵抗よりも、機械的応力とかデューワー構造の複雑さのため実用化は困難との見解が述べられている。確かに上記DEALマグネットを念頭に置けば、そのような問題点がネックとなって分割型は実際的でないとの結論が出されよう。しかし核融合炉は核分裂炉とは異なって炉心プラズマの表面から熱を取るために材料的な観点から壁負荷の制限を受けており、どうしても炉が大きくなる。すなわちそれだけ材料に生ずる歪が大きくなり、欠陥も生じやすいという宿命にあって、補修・修理の容易性はますます重要視される。そこで分割型にすることのメリットは非常に大きいのであるから、より現実的な設計研究を鋭意行なって、その実現を多方面から追求すべきであろう。

§ D型 コイル

ここで提案するものは(B)図に示すよう張力一定型D型コイルを基本とするものである。このコイルはユニット内側に直線部(SS)を設け、そこに加わる電磁力を中央支持円筒(CL)にて支え、それ以外の部分は曲げ応力ゼロ(従って張力は場所によらず一定となる)となるようコイル形状を決定したものであって、その形状の計算法については多くの報告がある。この形状のコイルを、例えば上下対称な二点BB'で分割・接続する場合、接続に際して必要とされる機械的強度は、その張力のみ能耐えるよう設計されていけばよい。実際のコイルにおいてはコイルの中が有限で、応力分布も上で述べたよう張力のみというわけにはいかず理想状態とは異なるが、その問題について本文で深入りすることはしない。このタイプのD型コイルは今までに発表されている多くのトカマク炉の概念設計研究で採用されているもので、超電導マシーンにおいては、中央支持円筒は全ユニット共通の低温容器内に設置されている。

この、共通低温容器を有す構造の問題点の一つは、コイルの一ユニットを修理する時にも全コイルを常温に戻さねばならぬことで、その点、各ユニットを独立した低温容器に入れる事を前提とした先のDEALマグネットの方が優れている。D型コイルを用いて独立の低温容器を持たせることも可能であって、例えば(C)図のような構造を考えることも出来る。この方式において、周囲が混み合っているD型コイル中央直線部の導体支持用絶縁物は、できるだけその厚みを小さくする。しかしそうすると熱侵入量は増大するから、直線部の支持はなるべく控え、それに代って上下の十分空間に余裕のある場所にて、比較的厚みの大きい絶縁物で応力を受けとめることが得策と考えられる。特にアスペクト比の大きくとれるステラレーター等、非軸対称系トーラス装置においては、ユニットの内側の形状も曲げ応力なしの一定張力型形状とし、力を上下の二点

のみで支えるよう工夫してもよい。コイル支持方法についてこの他色々な案が考えられるが以下では (B) の方式を対象として検討を進める。

§ コイルの接続

曲げ応力なしの D 型コイル断面に加わる張力 f はその場所の曲率半径を ρ とすると,

$$f = \rho F \quad (1)$$

ただし F は曲率半径外側方向へのコイル電流に加わる単位長当りの電磁力である。いま, コイル電流を I , ユニット内の巻数を M_u , 磁束密度 (平均値) を B , 巻線支持物の実効断面積を S とすれば, 引っ張り応力は

$$\sigma = \frac{f}{S} \sim \frac{\rho B M_u I}{2 S} \quad (2)$$

で概算できる。ここで実用炉を考え, 例えば全アンペア・ターン (AT) = 2×10^8 AT, ユニット数 $N_u = 20$ とすれば $M_u I = 1 \times 10^7$ A, となる。さらに $\rho = 10$ m, $B = 5$ T, $S = 0.5$ m² とすれば

$$\sigma \simeq 50 \text{ kg/mm}^2$$

この応力を導体のみで支える事は不可能であるから, その解決法としてディスク型コイルの適用が検討されている。ディスクの構造は第 2 図に示すようユニットと同一形状を有す SUS 製の板に何本もの溝を設けて超電導線を埋め込むもので, この場合上記応力は SUS 製ディスクの断面に加わることになる (当然ディスクには SUS 以外, アルミ合金等, 別種材料の使用も検討されている)。第 2 図には示していないが, ディスクには冷却用ヘリウム流路が切っており, また導体埋め込み溝と導体間には絶縁物をはさまれている。また溝内の導体を固定するため,

Fig. 2 Disk type coil

溝にはふたが設けられる。

ところで、本報にて提案するユニット分割・接続法はこのディスク型をベースにするものであって、その原理的構造を第3図に示す。この特徴は

- (1) 接続部において、ディスク分割部の重ね合わせを階段状(巾 l)とし、各層に埋め込まれた超電導線接続端部の表面がむき出しになるよう製作する。超電導線の接続は1本1本独立に半田づけ、あるいはボルト締めをすることによって行なう(溶接は問題が多い)。
- (2) 機械的張力の伝達は超電導線を通しては行

なわず、ディスクの巾を広げ、その部分に継ぎ手を設けることによって行なう。

の二点である。継ぎ手部の構造は第3図に示したものの以外、例えば、ディスク巾の広がりに応じて導体溝の間隔を広げ、そのすき間に継ぎ手を設けるよう工夫してもよい。接続部では発熱が大きいからその冷却法については別途慎重な検討を必要とするが、その問題には立入らない。

Fig. 3 Joint section

Fig. 4 Connection of
superconducting wire

超電導線の接続法として好ましいのは第4図(A)のようなテーパ式(tee-joint)の構造である。このようなもので十分低い接続抵抗が得られれば、導体断面形状を変えずに接続が可能であるから、第5図(A)に示すような単純な構造でディスクの機械的接続ができる。この図において応力はボルトに加わることになり、その強度が十分とれるか否か疑問が残る。そこでボルト接続の代りに(B)図に示すよう、接続部に凹凸をつけ、コの字型の橋渡し構造物で接続することも考えられる。(B)図のような構造においては、その橋渡し材の断面が力を伝えるのに有効に使用されるから、デ

超電導トロイダルコイル分割可能性についての検討

Fig. 5 Mechanical connection of disks

ディスクの広がり、は、もとの巾の50%増程度で十分と考えられる。なぜなら、ディスクには溝が埋ってあってその実効断面積はみかけの断面の半分以下になっており、それと同程度の断面積が継ぎ手部で確保されていればよいからである。継ぎ手に関してはいずれにせよ、なるべく寸法が小さくでき、かつ着脱操作が容易な構造の検討をすべきであろう。もし超電導線の接続法としてより単純なFig.4 (B)のような構造を使う場合、ディスク接続部の構造は(A)の場合より複雑になることは避けられない。一例として第6図のような構造が考えられる(同図において継ぎ手部は描かれていない)。さらに分割されるユニットの一方と他方において、超電導線材の種類を変える、いわゆる接合型の採用も可能であろう。〔5〕

Fig. 6 Connection of superconducting wire and disks

具体的には磁界の強いユニット内側において化合物系(Nb_3Sn 等)の線材を用い、磁界の低い外側は合金系の NbTi を使えば空間利用率

とか線材コストの点でメリットが多い。

§ 発 熱 量

ここで提案している接続法に関し、その接続抵抗による発熱量を概算してみる。接続抵抗の平均値を R 、全巻数を $M_t = (AT)/I$ とすれば、一卷当り接続箇所は 4 箇所であるから全発熱量 W_t

$$\begin{aligned} W_t &= 4 M_t R I^2 \\ &= 4 (AT) R I \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。 R を小さくするには l を大きくすればよく、常識的には $R \propto l^{-1}$ と考えられる(文献〔6〕には l を大きくしても R の減少には限界がある旨の実験的指摘がなされているが、その条件が明らかでない)。一応 $R \propto l^{-1}$ と考えてみると、 W_t を減らすには l を大きくしていけばよいのであるが、あまり l を大きくすると L (第3図) も大きくなり、接続領域のコイルユニットに占める割合が非実用的なほど大きくなってしまう。そこで一応の目安として $l = 10 \sim 20 \text{ cm}$ に押えたい。 l が 10 cm のとき $I = 10 \text{ KA}$ 級導体に対し $R \sim 10^{-9} \Omega$ が報告されている〔7〕。 I の大きい導体はそれだけ巾も広くなり接続抵抗は減少するから、単純には $RI \sim$ 一定、としてよからう。上の場合は $RI \sim 10^{-5} \text{ V}$ で、先の数値例において $W_t \sim 8 \text{ KW}$ となる。これは許容出来る発熱量である。この発熱を接続部の導体の表面から熱伝達にて放散させようとした場合、導体の巾 $w \sim 5 \text{ cm}$ 、 $l = 10 \text{ cm}$ とすると wl の面積を通過する熱量 h は

$$h = \frac{RI^2}{wl} \sim 100 \text{ W/m}^2 \sim 10^{-2} \text{ W/cm}$$

もし、実効的な伝熱面積がこの $1/10$ としても $h \sim 0.1 \text{ W/cm}^2$ で、これは液体ヘリウムと導体表面間の温度差約 0.2° K によって十分除熱可能な値である。もし導体の接続抵抗がもう一桁下がり $RI \sim 10^{-6} \text{ V}$ の桁となり、かつ $l \sim 7 \text{ cm}$ で良いというのなら、 $L \sim 140 \text{ cm}$ となって構造上のメリットは大きい。

ところでリード線を通しての侵入はどの程度になるであろうか、ガス冷却方式を採用した場合の侵入量 W_ℓ は

$$W_{\ell} \sim 3 \times 10^{-3} N_u I$$

〔8〕
 で与えられ、以上の数値例において $W_{\ell} \sim 3 \text{ KW}$ である。これも問題にならない。DEAL マグネットの場合 $I = 300 \text{ KA}$, $N_u = 16$ とすると $W_{\ell} \sim 15 \text{ KW}$ となりかなり大きい。なおトカマク炉においては、時間的に変動するポロイダル磁界によってトロイダルコイル内に渦電流損が生じ、これが無視出来ない値となる。しかし分割型トロイダルコイルの使用で、ポロイダルコイルをその内側に設置できれば、トロイダルコイルに作用する変動磁界を小さくでき、渦電流損をかなり減らすことが可能になろう。しかし巾広の導体を必要とする DEAL マグネットで渦電流を減らす事は困難と思う。

§ 炉 の 構 成

トカマク炉の基本的構成を第7図に示すが、トロイダルコイルの具体的分割法として図示のように AA' , BB' , CC' の三点が考えられる。上下対称的でない分割箇所としては図示のもの以外多くの案が考えられるがここでは上記三通りのみを比較してみる。理想的な観点からは、 AA' の直線部両端でユニットを切断し、他の要素を動かすことなく上方へ引き抜くことができれば非常に便利である。しかし接続部の外側寸法は他の部分より大きくなるからこのような引き抜き構造の実現には無理が多い。そこで、周囲空間に余裕のある BB' , CC' を考えてみる。いずれもこの中心部を引き抜くのは、中央支持円筒とその内部にある OH コイルを取り除き、そ

Fig. 7 Conceptual construction of Tokamak reactor

Fig. 8 Removal of the center section of toroidal coil

こを空にした状態でBB'なら第8図のような、CC'なら第9図のような操作で実行できよう。BB'の場合、もし中央支持円柱を動かすことなく、ユニットを真上に引き上げたいと思うなら、内側のシールドをその前に取り除けるよう工夫すればよい。それにはシールドを分割構造（あるいは液体）にし、そのみ取りはずせるよう設計すればよい。しかしこのような構造では内側にポロイダルコイルが設置できないし、またシールドをはずせば放射化したブランケット部がむき出しになるなどの問題点を有するから、第8図のようなOHコイルの撤去を前提とする方が無理がない。

以下では第8図のような構造を採用するものとして、炉の組み立て、分解等について考察を加えてみる。第10図は真空容器の構成を示したもので、このような炉を組み立てるには、半径が大きい真空容器の上部を取りはずし可能としておく必要がある。その作業手順の一案を第11図

Fig. 9 Removal of toroidal coil by rotation

に示す。この図に示すよう、半径の小さいトロイダルコイルは真空容器上部をのせる前に組み込んでおかねばならない。また完成後トロイダルコイルの一つのユニットの中央部をはずそうとする場合は(6)から(3)まで戻らなければならない。しかしこの作業は、シールド外側の立入可能区域内で遂行でき、移動を必要とされる各要素の重量もそれ程大きくないから、十分容易と思われる。また、特にブランケットの一部なら、第8図(B)のようコイルの間を通して取り出せるし、またもっと大きなブ

Fig.10

Construction of Tokamak reactor
with splittable toroidal coils

ランケット部の取り出しを考えても、せいぜい(6)から(5)の段階までの分解ですむから、実際にはOHコイルをはずす必要はそう多くないと思われる。以上のように実際の補修・修理を考えると、分割型は非分割型に比しかなり優利な点が多い。

Fig. 11 Procedure of the assembling of Tokamak reactor
with splittable superconducting toroidal coils

§ 結 言

各種のプラズマ閉じ込め方式の中であってトカマク型は最も研究が進んでいるにもかかわらず、低 β であることおよびパルス動作である事等が実用化に際してのネックとして指摘されて来た。しかしそれ等は最近の研究によっていずれも解決可能との見通しが得られ、次の問題として、炉の分解・修理をいかに容易にするかが設計研究の最大の課題としてクローズアップされている。特に長時間連続運転を目標とする場合 α 粒子の排出、不純物対策の観点からダイバータの組み込みが望まれ、できる事なら超電導ポロイダル・ダイバータコイルをトロイダルコイルの内側に設置したい。さらに、核融合・核分裂ハイブリッド炉ともなると、そのブランケット構造は一層複雑化し、装荷燃料の交換等のためにブランケット部へのアクセスビリティを大きく取らねばならない。話をステラレータ等、非軸対称系トーラス装置へ移せば、そのヘリカルコイルを超電導化するには、その組み立て上、分割型を必要とする。以上述べた種々の観点から、超電導コイルを分割可能とすることはトーラス炉の実用化にとって好ましいし、あえて言えば不可避と考えてよいのではなかろうか。分割型を実用化するための開発はそう容易なものではないが、その困難さを補って余りある利点をもたらすことは本文で指摘したとおりである。INTORレポートの指摘にあるよう分割型の問題は応力と構造の複雑化という機械的なもので、本文で指摘したようなことをベースによれば種々の改良案が考えられると思う。本文がその方面の興味を広めるための参考となれば幸である。

なお、本検討を行なうにあたり、日本原子力研究所、辻 博史氏より貴重な助言をいただいた。ここに深謝の意を表する。

超電導トロイダルコイル分割可能性についての検討

文 献

- (1) 孤崎, 他 JAERI-M 7320 (1977)
- (2) 例えば 迫, 他 JAERI-M 8518 (1979)
- (3) R.J.Powell, et al, Cryogenics Vol. 20, No. 2, 59 (1980)
- (4) "International Tokamak Reactor: Zero Phase" IAEA Vienna (1980)
- (5) 桂井, 低温工学 Vol. 12, No. 6, 231 (1977)
- (6) V.N.Shakhtarin and S.N.Pylinina, Proc. 6th Int. Conf. on Magnet Technology 772 (1977)
- (7) 辻, 私信
- (8) 電気学会「超電導ハンドブック」第6章